

## 個別要素法の3次元発破解析への適用に関する検討

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 今野 真精  
 新潟大学工学部社会基盤工学プログラム 正会員 阿部 和久  
 株式会社 福田組 正会員 若月 和人  
 新潟大学工学部社会基盤工学プログラム 正会員 紅露 一寛

## 1. はじめに

トンネル工事において広く採用されている発破掘削方式では、発破による振動が発生するため、周辺環境に及ぼす影響が懸念される。振動を低減する方法として、掘削面中央の心抜き部にあらかじめスリット状の自由面を設けて発破を行なう「心抜き自由面発破」という方法がある。既往の研究<sup>1)</sup>では個別要素法による二次元解析を用いてその力学特性の解明を試みているが、実際の破壊挙動は三次元的に起こるため現実とは異なる点を有する。本研究では、三次元個別要素法の発破解析への適用を念頭に、解析負荷軽減策について検討を行う。

## 2. 自由面発破掘削の概要

心抜き自由面発破では、トンネル中央部に、図1のようなスリット(自由面)を設けるパターンが多い。既往の研究<sup>1)</sup>では、自由面発破を模擬した発破実験の結果をふまえて、発破孔の近傍ではおおむね2次元的な議論が可能であるとし、数値解析的検討に2次元解析を適用していた。しかしながら、発破に伴う挙動は厳密には3次元である。このため、3次元解析によるその効果の検討が望ましい。

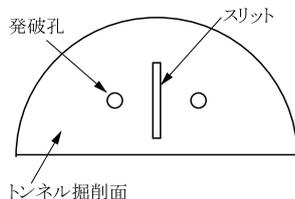


図1 トンネル掘削面

## 3. 個別要素解析の概要

個別要素法では、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。周りの粒子から受ける接触力を知ることで、ニュートンの運動の第二法則より粒子の加速度が得られる。加速度を時間積分すると速度、さらに変位が得られ、粒子群の運動軌跡が計算できる。この方法で運動する全ての粒子の軌跡を求めることで、粒子群全体の挙動を評価する。

本研究では、四面体個別要素による解析を行い、破壊発生前の接触要素の作用力は、接触面の3つの頂点で評価する。接線方向のせん断破壊はクーロンモデルで表現する(図2)。

法線方向の引張破壊は、初期の弾性限界応力 $\sigma_f$ に対応する法線方向相対変位 $u_E$ を超過したら、 $-k_f$ の傾きで応力を

低減させる(図3)。その後の除荷時には、除荷開始点から原点に向けて剛性を低下させる。合わせて弾性限界の変位を除荷開始点の変位に更新する。引張変位が $u_f$ に達したら完全に破壊したものとし、結合面の3つの頂点のうちいずれか1つで破壊を生じたら、面どうしの結合を完全に解放する。

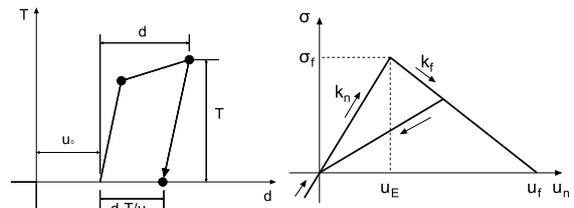


図2 せん断破壊

図3 引張破壊

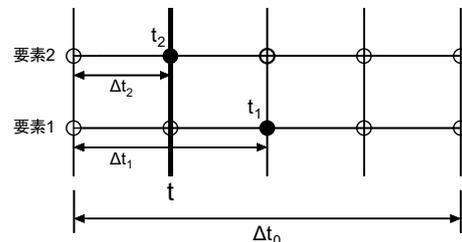
破壊面の各辺を $n$ 等分し、各辺 $n-2$ 個の球形接触子を配置する。接触子の直径は球が四面体に内接するように、それぞれの要素で設定する。破壊後の接触解析は、これらの接触球どうしで行う。また、接線方向力は摩擦力のみ作用するものとする。

## 4. 解析時間短縮の工夫

## (1) 要素毎の時間増分設定

発破解析では発破孔近傍の要素が非常に高速度で移動するため、安定解を得るには時間増分 $\Delta t$ を小さくする必要がある。しかし、他の多くの要素はほぼ静止状態にあり、比較的大きな $\Delta t$ でも安定解を得ることができる。そこで要素移動距離の許容最大値 $l$ を設定し、要素毎に運動速度 $v_i$ から時間増分 $\Delta t_i$ を決定する。初期値を $\Delta t_i = \Delta t_0$ とし、 $\Delta t_i$ を1/2倍して行き、 $\Delta t_i \leq l/v_i$ をみたすまでこれを繰り返す。

要素毎に時間増分 $\Delta t_i$ 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4)。

図4 現時刻 $t$ と要素の時刻 $t_i$ の関係図

要素間作用力 $F$ に時間増分 $\Delta t_i$ を乗じて力積を求め、関連要素の力積に加算していく。 $\Delta t_i$ 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。

**Key Words:** 自由面発破掘削, 個別要素法, 解析負荷軽減

連絡先: 〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL: 025(262)7028, FAX: 025(262)6775

## (2) 計算の並列化

接触判定及び接触力計算は、各要素とそれよりも要素番号が大きい要素との間で行われる。計算は要素毎に独立となるので、各プロセッサに担当する要素番号を割り振り、接触力計算を行う。各プロセッサで計算した接触力のデータをメインのプロセッサで合計し、時間積分及び幾何データの更新を行う。この操作を各時間ステップ毎に繰り返す。

## 5. 解析結果

### (1) 解析条件

当研究では、既往の研究<sup>1)</sup>で行なわれた自由面発破実験の再現解析を行うものとし、当該実験で用いたコンクリート供試体を四面体要素でモデル化した。なお当解析では、コンクリート供試体の奥行きを20cmとして準二次元状態とし、文献2)との比較を行った。

メッシュサイズは発破孔近傍を約5cmとし、発破孔から遠くなるにしたがって大きくし、最大で約70cmとなるように分割した。その結果、四面体要素数は962個となった(図5)。また要素移動距離の許容最大値を $l = 1.0 \times 10^{-8} \text{m}$ 、最大時間増分を $\Delta t_0 = 1.0 \times 10^{-8} \text{s}$ とした。その他の物性値は文献2)に合わせて設定した。

発破孔に作用するガス圧は、発破孔に接する面を有する要素の重心に対して、接している面の法線方向に内圧として与えた。圧力の基本波形は次式により与えた<sup>2)</sup>(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。

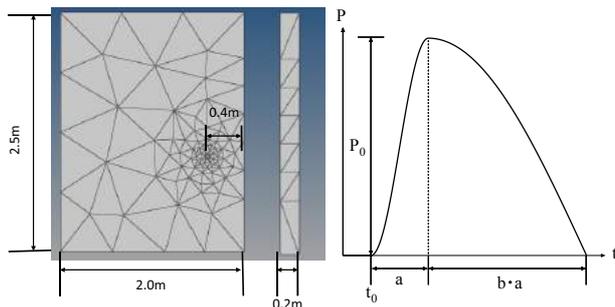


図5 解析モデル

図6 圧力波形

### (2) 破壊状況

上記の条件での解析により得られた発破後 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}$ までの破壊状況を図7に示す。発破孔近傍は細かく破碎され、放射状に亀裂が伸びているのが窺える。上下方向や自由面方向に伸びる亀裂に関しては実験結果<sup>2)</sup>(図8)を概ね再現できている。



図7 解析結果  
( $t=1.0 \times 10^{-3} \text{s}$ )



図8 発破実験の様子<sup>2)</sup>  
( $t=0.0200 \text{s}$ )

### (3) 要素毎の時間増分設定による効果

発破後 $5.0 \times 10^{-5} \text{s}$ までの解析に要した時間は、要素毎に時間増分 $\Delta t_i$ を設定した場合で14分、全要素に同一の時間増分 $\Delta t$ を設定した場合は16分となり、解析時間に大きな差は生まれなかった。しかし、発破後 $3.5 \times 10^{-4} \text{s}$ までの解析を行った結果、解析時間はそれぞれ1765分と4029分となり、半分以下となった。このことから、要素の移動速度が大きくなる圧力立ち上がり後の計算において、計算速度に違いが表れていることがわかる。

### (4) 並列化による効果

並列計算に用いるプロセッサ台数による計算速度の違いを比較するため、発破後 $5.0 \times 10^{-5} \text{s}$ までの解析時間を測定した。その結果を図9に示す。並列化をしない場合は889秒、24個のプロセッサで並列計算を行った場合は147秒となり、およそ1/6となった。プロセッサ台数の増大に伴い計算速度も向上するが、その効果は徐々に低減していく。

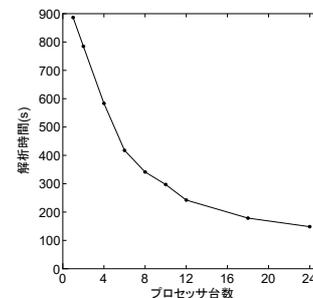


図9 解析時間

## 6. おわりに

本研究では、三次元個別要素法の発破解析への適用を念頭に、解析負荷軽減策について検討を行った。その結果、当解析手法により自由面発破による破壊挙動を概ね評価可能であり、解析時間は当初の解析手法に比べおよそ1/6に短縮することが可能となった。ただし、並列化効率の改善には、さらなる工夫が必要である。

### 参考文献

- 1) 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, Vol.72(3), L16-L27, 2016.
- 2) 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 Vol.15, pp.19-24, 2015.