

個別要素法の3次元発破解析への適用と解析負荷軽減策の検討

| | | |
|---------------|------|-------|
| 新潟大学大学院博士前期課程 | 学生会員 | 今野 真精 |
| 新潟大学教授 | 正会員 | 阿部 和久 |
| 株式会社福田組 | 正会員 | 若月 和人 |
| 新潟大学教授 | 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。そのため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⁾。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きた^{2),3),4),5)}。

過去に実施した実験結果の再現解析を通して、切羽面から奥行き方向に平面ひずみ状態を仮定しても破壊性状を概ね再現可能であることを確認した^{3),4)}。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ことは適切でない。

そのため三次元解析が望ましいものの、当該問題では発破孔近傍のみ細かく破碎され、さらにガス圧の作用により運動速度も局所的に大きくなる。この場合、発破孔近傍の個別要素サイズ、および安定解を得るための時間増分を十分に小さく取る必要がある。したがって、領域全体の要素総数がそれ程多くなくても解析に相当な時間を要し、時間短縮策が不可欠となる。

本研究では、時間積分の方法や並列計算上の工夫などについて検討し、解析時間短縮策を講ずる。

2 個別要素解析の概要

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。破壊前における要素間接触力は、3つの頂点で評価する。せん断破壊は図-2の様にクーロンモデルで与え、法線方向の破壊モデルについては図-3の様に設定する。

破壊後は、破壊面の各辺を等分し、図-4の様に等分線の交点に内接する様に球形接触子を配置する。

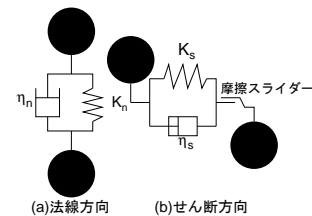


図-1 個別要素間接触ユニット

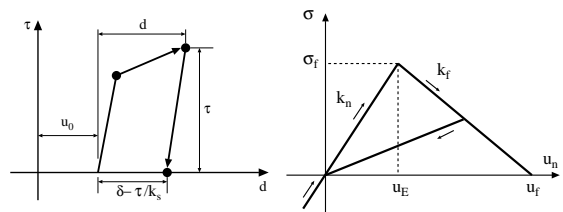


図-2 せん断破壊

図-3 引張破壊

3 解析時間短縮の工夫

3.1 要素毎の時間増分設定

発破孔近傍要素は、質量が小さく、高速度で運動するため、安定解を得るには時間増分 Δt を短く設定する必要がある。しかし、他の多くの要素はサイズが大きく、ほぼ静止した状態にあり、比較的大きな Δt でも安定解を得ることができる。そこで要素毎に異なる時間増分を設定する。

まず、1つの時間増分間における要素移動距離の許容最大値 l を規定する。その下で、 i 番要素の初期時間増分を最大値 Δt_0 に設定し、それを適宜 $1/2$ 倍していき、要素速度 $|v_i|$ から $\Delta t_i \leq l/|v_i|$ をみたす時間増分を決定する。

要素間接触力は、現時刻 t と何れかの要素時刻とが一致する場合に限り評価する。例えば図-5の様に1番と2番の要素間接触を考える場合、2番要素の時刻 $t_2 = t$ において

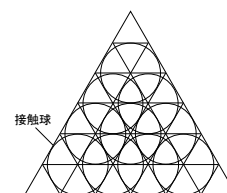


図-4 球形接触子の配置

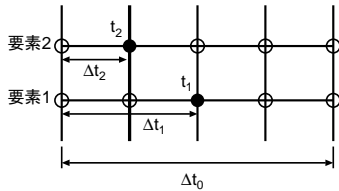


図-5 要素毎の時間増分設定における時間積分

接触力 F_{12} を求める。なお、図中の●は各要素の時間積分時刻である。ただし、1番要素の時間積分を行う時刻は t_1 であり、従来法では t_1 においてのみ接触力が評価される。時間増分の不一致によるこの様な時間積分上の問題を解消するために、時刻 t_2 における接触力に時間増分を掛けた力積 $F_{12}\Delta t_2$ を両要素の力積に加算する方法を採る。これにより、 i 番要素の時間積分時刻 t_i までの1ステップ間に当該要素に加算された力積の総和 S_i を用いて、次式のように速度更新を行う。

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \mathbf{v}_i^k + \frac{\mathbf{S}_i}{m_i} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{v}_i^{k+1} は i 番要素の第 $k+1$ ステップ目の速度、 m_i は質量である。回転成分についても同様にして更新する。

3.2 計算の並列化

個別要素解析のさらなる計算時間短縮策として、MPIによる接触計算過程の並列計算について検討する。

破壊発生前は、各要素に接触している要素が確定しているため、接触力計算を並列に行う際に、各プロセッサに対し概ね均等に要素を割り当てれば良い。しかし、破壊後の状態では、接触の可能性のある近傍要素数が要素毎に異なる。また、時間増分も要素毎に異なるため、プロセッサ毎の計算時間に差が生じ、全てのプロセッサが計算を終えるまで待機する時間が発生する。そのため本研究では、各プロセッサにおける接触計算量が概ね均等になる様に、分担する要素数を再配分する方法を採る。

まず、所定の時間ステップ区間において第 i 番プロセッサが接触判定及び接触力計算に要した時間を \hat{t}_i とし、横軸にプロセッサに割り振られた上限の要素番号 N_i 、縦軸に当該番号以下のプロセッサにおける計算時間の総和 T_i を取ると、図-6 の様な図を得る。なお、図中 n_i は i 番プロセッサに割り振られた要素数であり、 N_i は $n_1 \sim n_i$ の総和と与えられる。

次に、プロセッサ毎の計算時間を平準化するために、全計算時間 T_n より1プロセッサ当りの平均計算時間 $\hat{t}' = T_n/n$ (n はプロセッサ総数) を求める。そして、 \hat{t}' で全計算時間 T_n を等分割し、各時間に対応する横軸の値を第 i 番

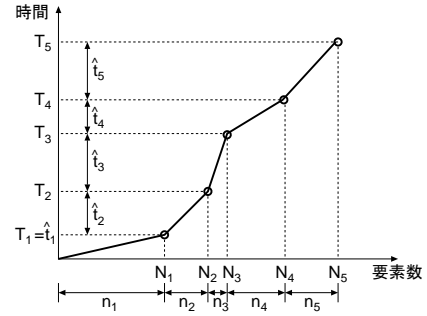


図-6 要素数とプロセッサ数の関係図

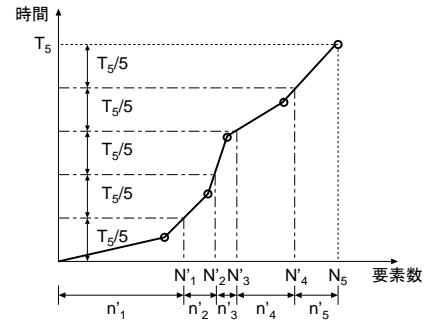


図-7 要素数の再配分

プロセッサが担当する要素番号の新たな上限値 N'_i として与え、 $N'_{i-1} + 1$ から N'_i までの要素を i 番プロセッサに割り当てる (図-7)。

4 解析結果

4.1 解析条件

本研究では、既往の研究^{3),4)}で行なわれた自由面発破実験の再現解析を対象とする。その際に、奥行き3mのコンクリート供試体の全体モデルでは1ケースの計算に一ヶ月以上を要すると予測されるため、現実的でない。そこで、文献^{3),4)}に準拠して、奥行きを20cmとした準二次元平面モデルを解析対象とする。

解析領域の個別要素分割の様子を図-8に示す。直径約5cmの発破孔を右側面から40cmの位置に設け、その近傍を約5cmサイズの要素で分割して、発破孔から遠退くに従いサイズが大きくなるようにした。なお、節点数と要素数は、それぞれ277および962である。1ステップ間の要素移動距離の許容最大値は、試算に基づき $\ell = 1.0 \times 10^{-8}$ m と設定した。また、最大時間増分を $\Delta t_0 = 1.0 \times 10^{-8}$ s とした。図-4の接触球は、各辺を5等分割して与えた。

発破孔内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。その際の圧力の基本波形は、文献³⁾における逆推定結果に基づき、次式に

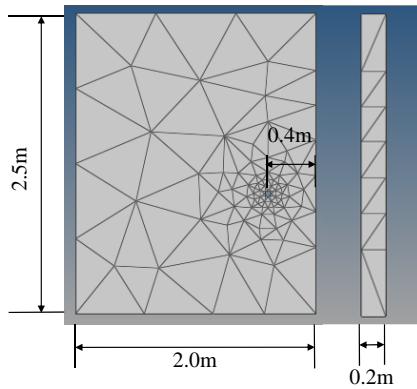


図-8 解析モデル



(a) 解析結果

(b) 実験結果

図-10 解析結果と実験結果の比較

より与えた.

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

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-9). 各パラメータの値は、 $P_0 = 5.75 \times 10^8$ Pa, $a = 1.33 \times 10^{-4}$ s, $b = 2.75$ と設定した³⁾.

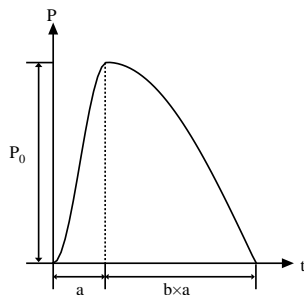


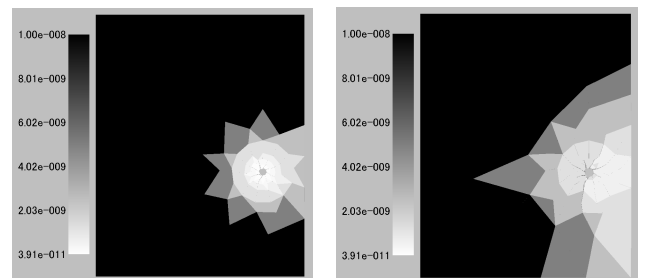
図-9 圧力の基本波形

4.2 破壊状況の確認

上記条件での解析より得られた、発破開始後 1.0×10^{-3} s における破壊状況を図-10(a) 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様子が窺える. 亀裂の分布に関しては図-10(b) の実験結果³⁾ を概ね再現できており、本準二次元解析の妥当性が確認できる.

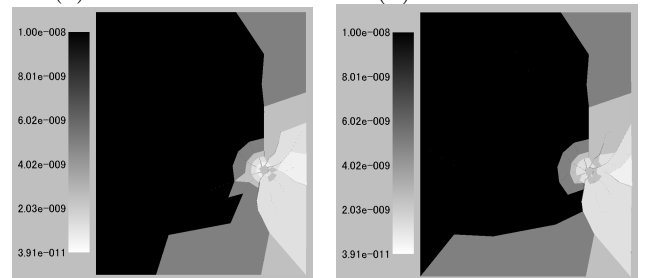
4.3 要素毎の時間増分設定による効果

まず、発破開始から 1.0×10^{-3} s までの幾つかの時刻における、時間増分の空間分布を図-11 に示す. 発破孔内の圧力作用による周囲への波動伝播に伴い、時間増分が短く設定されている領域が右側面と底面に沿って徐々に広がっていく様子が確認できる. なお、発破後 2.5×10^{-4} s の時点における発破孔近傍要素の時間増分が解析全体の中で最



(a) $t = 2.5 \times 10^{-4}$ s

(b) $t = 5.0 \times 10^{-4}$ s



(c) $t = 7.5 \times 10^{-4}$ s

(d) $t = 1.0 \times 10^{-3}$ s

図-11 Δt の分布

も短い値をとっており、約 4.0×10^{-11} s となった. 一方、発破孔から左手遠方に位置する要素はほぼ静止状態にあり、時間増分は最大値 $\Delta t_0 = 1.0 \times 10^{-8}$ s のままであった.

発破開始から作用圧力が上昇し、再びゼロとなる時刻に概ね相当する 5.0×10^{-4} s までの解析に基づき、以下の各種検討を行う. 当該時刻までの計算に要した時間は、全要素で同一の時間増分を設定した場合で 3897 分、要素毎に時間増分を設定した場合では 2702 分となり、約 70%まで解析時間を短縮することができた.

4.4 接触計算の並列化による効果

MPI による並列計算に用いるプロセッサ数と、発破後 5.0×10^{-4} s までの解析における加速率 (1 プロセッサによる計算時間と並列計算で要した時間との比) との関係を図-12 に示す. 図には個別要素解析全体の計算時間に関する加

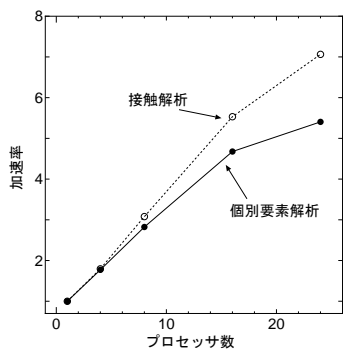


図-12 プロセッサ数と加速率の関係

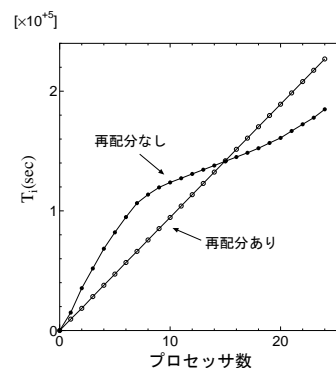


図-13 プロセッサ毎の計算時間

速率と、その内並列計算を適用している接触解析に要した計算時間に関する加速率の2つを示した。なお、計算の際には上述の要素毎の時間増分設定法を適用している。また、各プロセッサへの要素再配分の更新間隔は、試計算に基づき50ステップに設定した。

図-12には最大24プロセッサまでの計算結果を示した。加速率自体は決して高くないものの、16プロセッサまで概ね線形に増加している。この傾向は接触解析部分の計算時間においても認められる。

各プロセッサが分担するマスター要素数を固定値として割り振った場合についても並列計算を行った。再配分を行う場合の計算時間が501分であったのに対し、再配分なしでは541分となり、8%程度ではあるが再配分による効果が確認できた。

要素再配分の有無によるプロセッサ毎の計算時間を図-13に示す。図は $t = 5.0 \times 10^{-4}$ sまでの間になされた接触解析関連の並列計算に費やした時間 T_i を図示したものである。再配分によってプロセッサ番号 i と T_i との関係はほぼ線形となっており、各プロセッサの接触計算に要する時間が概ね均等に保たれている様子が確認できる。プロセッサ毎の計算時間における最小値と最大値は各々9023sと9787sとなっており、その比率は約1.1倍となっている。一方、再配分を行わない場合、計算時間の最小値と最大値は各々3493sおよび20381sとなっており、その比率は約5.8倍であった。

$t = 5.0 \times 10^{-4}$ sまでの解析に要した計算時間に基づき以上の結果を要約する。全要素同一の時間増分を設定して1プロセッサで解析した場合を基準とすると、要素毎に時間増分を設定することによる加速率が1.4倍、さらに接触計算の要素再配分を伴う並列計算により約8倍(24プロセッサ)まで向上させることができた。

5 おわりに

本研究では、三次元個別要素法による発破解析を対象に、解析時間短縮策について検討した。まず時間積分における時間増分を運動速度に基づき要素毎に設定する手法を採った。その際に、力積を接触要素間で共有し、それを加算することで、要素毎に異なる時間増分でも時間積分可能な手法を構成した。

また、個別要素解析における接触判定と接触力計算の並列化について検討した。その際に、破壊進展等により接触計算に要する時間が要素毎および時刻毎に変動するため、各プロセッサに割り振る要素数を適宜調整し、計算負荷の平準化を図った。

これらの工夫により、24プロセッサによる並列計算で約8倍の加速率が得られ、本提案法の有効性を確認することができた。

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) 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.
- 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) 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.L.1-L.10.
- 5) 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.L.16-L.27.