

個別要素法を用いたコンクリート供試体発破実験の再現解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 齋藤 優
 (株) 福田組 正会員 若月和人
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛

1. はじめに

トンネル掘削工事で、爆薬を用いた発破掘削方式を採用する場合、発破振動が周辺環境に及ぼす影響が懸念される。1つの振動低減法として掘削面中央にあらかじめスリット状の自由面を設ける「心抜き自由面発破」という方法がある。当研究室では、当該法を想定し、発破孔から自由面までの距離が破壊領域面積や放射波動エネルギー等に及ぼす影響について検討した¹⁾。しかし、解析には2次元個別要素モデルを用いており、実際の発破孔周辺の3次元的破壊挙動の再現性が明らかではない。そこでコンクリート供試体を用いた発破実験を実施し、3次元的破壊挙動を明らかにするとともに、その再現解析を試みた。なおその際に、供試体に取り付けた加速度センサによる測定データから発破孔内圧力を推定した。さらに、材料試験等では設定困難な物性値が亀裂の進展や破壊領域に及ぼす影響を検討した。

2. 発破実験の概要

(1) 供試体の概要および計測システム

幅 2.0 m、奥行き 3.0 m、高さ 2.5 mの無筋コンクリート(配合 24-8-25BB)により供試体を作成した。発破孔は1孔(直径 52 mm、奥行き 1500 mm)とし、その内部にガス圧センサを、また発破孔の頂部①、側部②、前方③の3ヶ所に加速度センサを設置した(図1参照)。発破孔は発破孔中心から自由面までの距離を40cmに設定した。なお、別途行った材料試験より得られた物性値を表1に示す。

(2) 実験結果

発破実験後の供試体の様子を図1に示す。斜め左下方向に亀裂が伸びている。また、破壊面は発破孔とほぼ平行に広がっており、概ね2次元的事実であることがわかる。なお、加速度測定値の大小関係は、前方③<側部②となっており、おおよそ2次元的に波面が伝搬したものと推測される。

3. 圧力波形の設定

発破孔内部の圧力関数としては、立ち上がり時間に比べ緩やかに減少するようなものが種々提案されている。詳細解析を進める前に、文献²⁾の圧力関数を用いて、圧力波形と亀裂の伸長挙動との関係を定性的に評価した。その結果、圧力がピークに達した後の減少時間を、立ち上がり時間の



図1 実験結果

表1 物性値

項目	値
密度	2390(kg/m ³)
ポアソン比	0.2
せん断弾性係数	13500(MPa)
引張破壊強度	3.75(MPa)
法線方向バネ定数	450000(MPa/m)
接線方向バネ定数	90000(MPa/m)
法線方向粘性係数(非破壊域)	5.05(MPa・s/m)
接線方向粘性係数(非破壊域)	2.26(MPa・s/m)

3倍に設定することで、上述の亀裂の進展の再現性が向上する傾向が得られた。この圧力波形を参考に発破孔内部圧力の推定を進めていく。

(1) 発破孔内部圧力の推定

供試体に設置したガス圧はセンサの破損により測定不能であった。同様に加速度センサ①も破損により十分な測定データを得られなかった。そこで、供試体側部に設置した加速度センサによる測定波形から発破孔内部圧力を推定した。なお、当該実験に用いた加速度センサの応答周波数は5kHzであり、有意に設定したサンプリング間隔は10⁻⁴sと比較的粗い。また、上面および底面からの反射波が到達するまでの波形を用いるものとし、当該センサに圧力波が到達してから5×10⁻⁴sまでの5ステップを推定解析の対象とする。

(2) 推定手順

先の圧力波形と亀裂の伸長挙動との結果から、圧力は図2のように最大圧力P₀と立ち上がり時間aを未知量として設定した。なお、圧力波形は次式により与えた。

Key Words: トンネル発破, 発破実験, 個別要素法, 再現解析
 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) 7021

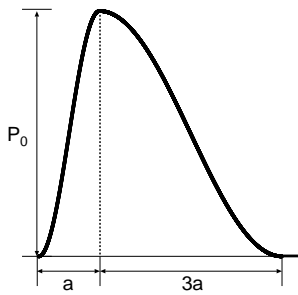


図2 圧力波形

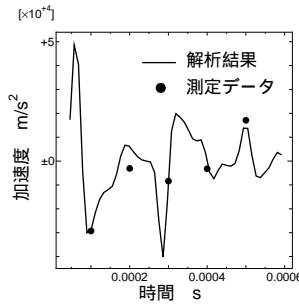


図3 推定結果

$$P(t) = \begin{cases} P_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{t}{a} - 1\right)\right) & 0 \leq t \leq a \\ P_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{6}\left(\frac{t}{a} - 1\right)\right) & a \leq t \leq 4a \\ 0 & 4a < t \end{cases} \quad (1)$$

この圧力波形に対する応答を境界要素解析より求め、圧力センサ②と同位置における加速度時刻歴を導出する。測定時刻における加速度データと、解析結果との誤差の二乗ノルムを目的関数として、 P_0 と a を推定した。

(3) 推定結果

推定結果を図3に示す。実線は解析結果、●は測定データである。解析は概ね測定値を再現できていることが確認できる。なお、このときの最大圧力は $P_0 = 5.70 \times 10^8 \text{Pa}$ 、立ち上がり時間は $a = 1.09 \times 10^{-4} \text{s}$ となった。

4. 個別要素解析

表1の物性値及び、3.(3)で推定した圧力を発破孔内に設定してDEM解析を行った。表1以外に設定すべき物性値として、破壊を受けた要素頂点の接触時に設定する粘性係数と、破壊エネルギー解放率 G_f とがある。これらについては、解析結果に与える影響を考慮しながら以下のように設定した。なお、底面は地盤と接しているため、地盤を等価な粘性境界として設定した。

(1) 粘性係数の影響

粘性係数は、破砕片を用いた落下試験から反発係数を求めることで算出する。ただし、粘性係数の設定にあたっては、実際の要素間の接触では摩擦や部分的破壊などの粘性以外の要因も考慮する必要がある。

また、DEM解析では、粘性係数を高く設定するほど破壊領域は小さくなり、同時に亀裂の進展も抑制される傾向が認められることから、破壊領域面積と亀裂の進展過程も考慮して設定することとした。

(2) 破壊エネルギー解放率 G_f ¹⁾

本DEM解析では、要素間距離が $u_t + 2G_f/\sigma_f$ に至った時点で要素間作用力を完全に解放するように設定している。ここで σ_f は引張破壊強度、 u_t は σ_f 発生時の接触バネの伸びである。 G_f を大きくすれば、破壊領域面積は小さくなり、方向性を持った亀裂の進展は顕著になる傾向が認められた。

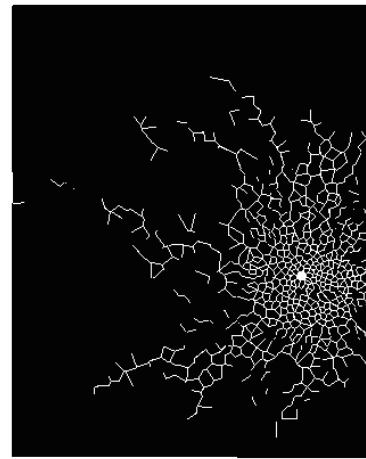


図4 解析例

(3) 解析例

以上の検討結果に基づき、粘性係数は落下試験から得られた値の1/10として $3.08(\text{MPa} \cdot \text{s}/\text{m})$ 、 $2G_f/\sigma_f$ を $3.0 \times 10^{-5} \text{m}$ と設定した。この場合の解析結果の破壊の様子を図4に示す。図は0.001sにおける結果であり、破壊した要素辺を白色で表している。

数本の方向性を持った亀裂が放射状に伸びている様子が窺える。また、右端自由面に平行に破壊域が伸びており、斜め左下方向に亀裂が伸びている点において実験結果との一致が認められる。なお、解析では左上方に亀裂が延びているが、実験では認められない。ただし、発破孔中心から自由面までの距離を30cmと設定した他の発破実験においては、同様の亀裂進展が認められ、本解析と符合する結果が得られている。一方、発破孔周辺の広く破壊された領域については、実験結果とは異なる傾向を示しており、さらなる検討が必要に思われる。

5. おわりに

発破実験により得られた物性値および実測データから推定した圧力を用いて、個別要素法による再現解析を試みた。4.(1)の粘性係数と破壊エネルギー解放率 G_f がおよぼす傾向を定性的に評価し設定することで、実験結果を概ね再現できた。また、実験結果では破壊の様子がおおよそ2次元であることから、発破による破壊過程は本研究で用いた個別要素法による2次元解析で概ね評価可能であると言える。

なお、今回は単一の要素分割を用いて解析を行ったが、亀裂の進展は要素分割に依存するため、今後は数種類の分割の下での解析を通し、その影響についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 趙祥鎬, 三宅秀和, 木村哲, 金子勝比古: 一自由面破砕の破壊プロセスに及ぼす圧力波系の影響に関する数値計算, Sci.Tech.Energetic Mat., 64(2003), pp.116-125.