

3. 岩質材料の掘削に関する線形破壊力学の応用—rock blastingについて—

(1) はじめに

岩盤掘削工法の中で発破工法は、せん孔技術の急速な進歩と安価な火薬類の使用により、発展、普及してきた。特に大量の岩盤掘削や硬岩掘削に適しており、これからも発破工法に匹敵する破砕方法がない限り火薬類の使用が続いていくものと考えられる。また一方、トンネル掘削では、トンネルボーリングマシン(TBM)やロードヘッダが使われてトンネルを掘る時代になってきた。特にロードヘッダは、軟岩トンネルで成果を上げており、その適用性が高まってきたものの、硬岩トンネルでは、火薬による発破工法と比べると比較にならないほど掘削単価が高くなる。近年、発破工法は、制御発破技術として検討されており、環境や構造物に与える影響への配慮や経済的な基礎岩盤の掘削等が期待されている。

現在、制御発破工法の一つとして爆破孔の周縁に切欠きやディスクをつけて爆破クラックを制御する方法が行われているが、その効果、あるいは理論的裏付けは十分であるとは言えない。本研究では、切欠きやディスクからのクラックの発生・発達を検討するための手法として、線形破壊力学を動的な問題に適用し、比較的等方均質といわれるセメントモルタルを材料として亀裂を持つ供試体の破壊実験を行った。

(2) 破壊力学と材料力学について

材料力学は、外力によって構造物の部材に生じる応力・ひずみを求め破壊や破損の有無を検討する学問である。実際の部材は、切欠きや孔などの応力集中部を含むものが多く、これらに対しては十分な注意が払われるが、亀裂に対しては考慮されず材料に亀裂を含まないという前提のもとに取り扱われている。それに対し線形破壊力学は、亀裂を持つ構造物の破壊や変形を扱うもので、小規模降伏の条件が満たされており、かつ亀裂先端付近の挙動のみによって支配される現象に適用できる。力学的環境パラメータは、材料が亀裂先端付近を除いて弾性を保っている場合において、亀裂先端付近で応力・ひずみ分布と一対一対応の関係にある応力拡大係数 K とエネルギー解放率 g を使用する。応力拡大係数 K は、一般に応力に比例しある限界値(破壊靱性値 K_{Ic})に達すると破壊が生じる。

(3) 線形破壊力学の応用

線形破壊力学を動的問題に適用し、亀裂を持つ供試体を用いて次の2つの実験と応力拡大係数による強度評価を行った。

a) 実験内容

実験方法として、①ディスクを有するモルタル供試体の爆破実験；ディスクを内部に持つ円柱供試体に爆速の異なる2種類の爆薬を用いて発破を行い、ディスクの直径と薬種・薬量の変化に伴う亀裂の進展と破砕状態を観察する。(図3.1参照)②衝撃引張応力を受けるモルタル棒の破壊靱性試験；切欠きを有するモルタル棒を空気砲弾で打撃し、モルタル棒を伝わる弾性波の大きさと破断状態を観察する。(図3.2参照)

実験解析として、①近似式を用いて応力拡大係数 K_I を求め、供試体破砕の様子と比較する。(表3.1参照)②実験により得られた応力から応力拡大係数 K_I とその限界値(破壊靱性値 K_{Ic})を求め、切欠きの長さとの関係を検討する。

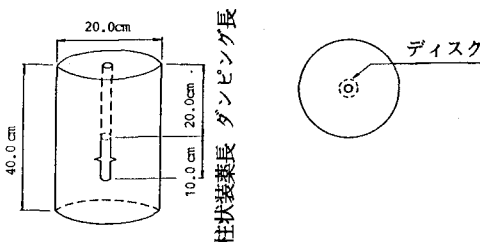


図3.1 供試体の形状・寸法及びディスクの位置

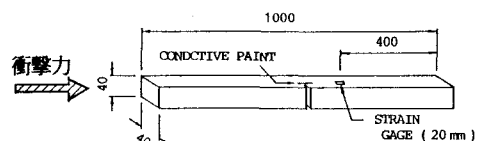


図3.2 供試体の形状・寸法及び切欠きの位置

b) 実験結果

実験結果として、①爆破実験では、爆破孔にディスクを設けることにより、ディスク方向に亀裂を発生・発達させることができる。またディスクが大きいほどその効果も大きい。コンクリート破砕器は、低爆速爆薬であるためディスクの効果も大きく、完全に亀裂の発生・発達を制御することができる。（写真3.1 参照）導爆線は、高爆速爆薬であるためディスク先端だけでなく、不連続面に垂直な亀裂が発生しやすい。

（写真3.2 参照）②衝撃試験では、切欠きが長くなると動的破壊靱性値はゆるやかな曲線を描き増加する。

以上2つの実験から得られた動的破壊靱性値 K_{Id} を比較すると、爆破実験による K_{Id} は、衝撃試験からの K_{Id} より大きな値を示した。中でも高爆速爆薬による K_{Id} が最も大きな値を示した。（表3.2 参照）よって動的破壊靱性値 K_{Id} は、亀裂の進展速度に依存し、異なった値を示すことがわかった。

表3.1 応力拡大係数と破砕の関係

高爆速爆薬				低爆速爆薬			
装薬組合せ	D50mm	D60mm	D70mm	装薬組合せ	D50mm	D60mm	D70mm
ED+DF5.0cm	104.91 ×	114.14 ×	122.09 ×	点+SLB1.0g	27.32 ×	29.72 ×	31.79 ×
ED+DF7.0cm	132.97 ×	144.67 ×	154.75 2	点+SLB3.5g	72.29 2	78.65 3	84.13 2
ED+DF9.0cm	162.06 多数	176.32 8	188.60 5	点+SLB6.0g	122.84 多数	133.65 3	142.96 2

上段（応力拡大係数 K_{Id} ），下段（破砕の有無・個数），ディスク直径（D50mm, D60mm, D70mm）
 高爆速爆薬 ---- 6号電気雷管（ED）+導爆線（DF）： $K_{Id}=7.0\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1/2}$ にて亀裂発生
 低爆速爆薬 ---- 点火具+コンクリート破砕器（SLB）： $K_{Id}=5.0\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1/2}$ にて亀裂発生

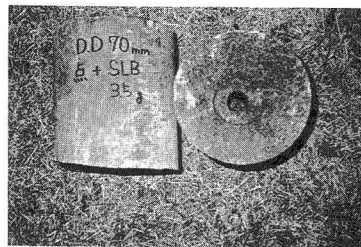


写真3.1 低爆速爆薬による破砕

表3.2 動的破壊靱性値の比較

実験	動的破壊靱性値 $K_{Id} [\text{N}\cdot\text{mm}^{-1/2}]$	備考
① 爆破実験		
高爆速	7.0	6号電気雷管(ED)+導爆線(DF)2.0cm, ディスク直径60mm
低爆速	5.0	点火具+コンクリート破砕器(SLB)2.0g, ディスク直径60mm
② 衝撃試験	2.3	切欠き長(a/W)=0.3 

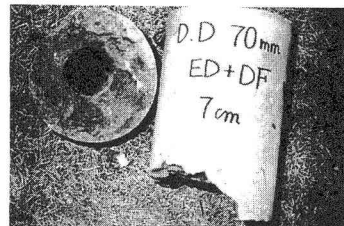


写真3.2 高爆速爆薬による破砕

(4) むすび

本章では、岩質材料の掘削への線形破壊力学の応用例として、動的破壊実験結果の例を示した。今後は、亀裂進展速度と動的破壊靱性値を比較検討する必要があると思われる。また、非線形破壊力学は、材料に大規模降伏あるいは全断面降伏が生じた後に破壊が発生する場合を対象とした理論であり今までのところ十分に研究されておらず研究途上にあるものも少なくない。本研究では、実験結果は必ずしも線形とはならず、線形破壊力学からアプローチし難い点がいくつかあるけれども、主題は線形としてどこまで扱えるかという点にあり、今回は、ひとまず非線形理論を除外して考えた。

参考文献；1)岡村弘之：線形破壊力学入門 倍風館。2)和田均, 高木豊, 西村融：日本機械学会論文集, 47巻417号, 78巻433号, 50巻455号。3)F. Ouchterlony: Analysis of Cracks Related to Rock Fragmentation, Swedish Detonic Research Foundation.

(山口大学工学部 荒木義則, 中川浩二)