

静的破碎剤の有効利用に関する研究

花 崎 紘 一・堀 川 晋 壱

Studies on effective uses of nonexplosive demolition agent

Koichi HANASAKI and Shinichi HORIKAWA

Abstract: Recently, when the blast by using explosives cannot be used to crush rock or concrete, the nonexplosive demolition agent is often employed. This paper describes a basic research on the demolish work of bedrock on the road shoulder or a concrete structure that became useless efficiently by using the nonexplosive demolition agent. That is, it has aimed to compare the measurement result of the mock experiment conducted in a construction site or in the laboratory with the result of the numeric simulation by a computer, and to offer necessary data and suggestion for the optimization construction plan.

1. はじめに

日本の国土の約70%は山地や丘陵で、平地に乏しいため開発は山を切り開き、また道路や線路は都市間を短くするために山沿いに造られることも多い。その結果、豪雨や地震などの自然災害では多くの岩盤斜面崩落事故が発生し、人々の生活に大きな影響を与えている。事前に斜面の不安定岩塊の処理などをして事故を起こさないのが最善であるが、崩落、落石事故が発生した場合の子割除去など、落石を速やかに除去可能な大きさに破碎し人々への影響を最小限にすることも重要である。また都市部では再開発の必要性が高まるなかで老朽化したコンクリート構造物の解体する必要性も増加しているが、構造物の解体には環境破壊や公害の点から、適用できる工法が限定される上に、近年では破碎対象となる構造物は単なる解体だけでなく部分的破碎など限定破碎や周辺住民への配慮した特殊破碎等と多様化してきている。

従来このような岩盤やコンクリート構造物の破碎には火薬類、重機械が用いられてきたが、これらの方法では騒音・粉塵・振動等の公害が伴うため、また、安全性の面からも問題視されている。このような情勢の中で、静的破碎剤を用いた岩盤やコンクリート構造物を破碎・解体する方法が注目されている¹⁾。この工法は図1に示す

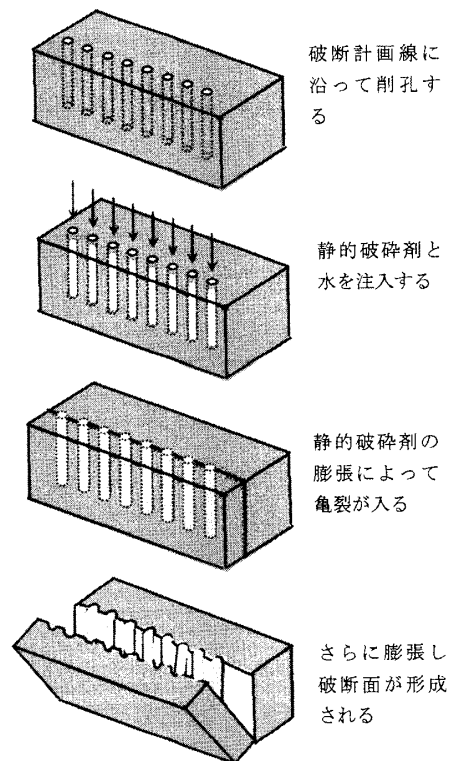


図1 静的破碎剤による破断法

ように被破碎体に穿った装薬孔に破碎剤を充填してから水を注ぎ込むか、あるいは、あらかじめ水と練り合わせた破碎剤を流し込むことによって、時間が経過するとともに破碎剤の主成分である生石灰が水との水和反応の進行と共に急激な発熱を伴い、最終的に生成物体積が膨張し、この体積膨張が火薬類に変わって岩盤やコンクリートなどの脆性材料を破壊するというものである。この静的破碎剤は火薬類とは異なり、取り扱いに火薬類の法的規制を受けずに使用ができ、しかも、火薬類や重機類による破碎と比較すると、振動、騒音はほとんどなく、飛礫、粉塵、ガスなどは発生しない、無公害かつ安全な工法という利点がある^{2, 3, 4)}。また、この施工法においては破碎剤を注入する装薬孔の孔数、直径や配置を選択することにより、亀裂の方向を比較的自由に制御できることも特徴の一つである。本論文は、静的破碎剤を使用する場合の効果的な使用法として、亀裂方向の制御法に関する基礎的な研究の結果について述べたものである。

2. 研究方法

まず、亀裂方向の制御法として従来から行われている装薬孔を整列させる方法の最適化について、有限要素法を用いた数値シミュレーションによって検討を行った。さらに、発生する亀裂の方向を制御すると期待できる簡単な器具を試作し、実験と数値シミュレーションを行ってその効果について検討した。

3. 装薬孔の配置による亀裂制御

装薬孔を複数本並べて穿ち、希望する直線上に亀裂が入るように設計する場合、一般に破碎剤の装薬長は孔径に比べて十分に大きく、孔口と孔底を除けば孔軸に垂直な面上の平面ひずみ状態で近似できるため、今回は弾性体の2次元平面ひずみ問題として計算した。また、亀裂の発生条件には、計算上簡便に用いられる相当応力（主応力差の自乗の和の平方根）の破壊条件を適用した。

3. 1 計算モデルと条件

図2は試料内の応力分布の計算に用いたモデルで、有限要素法の3角形6節点要素で行った⁵⁾。境界条件は図の二つの円孔に一定圧力条件、計算領域の上端と右端には面对称条件、左端と下端には自由条件を与えた。従って、上端と下端にそれぞれ4つの円孔が並んでいる場合の計算になっている。ただし、上端と下端の距離が円孔径 d および円孔中心から下端面までの距離（オフセット） h に比べて十分に大きければ、それぞれの存在が互いに影響しないから、片方の端面にのみ4つの円孔が存在する場合の計算ができる。表1に今回の計算で用いた穿孔径 d とオフセット h の値を示している。

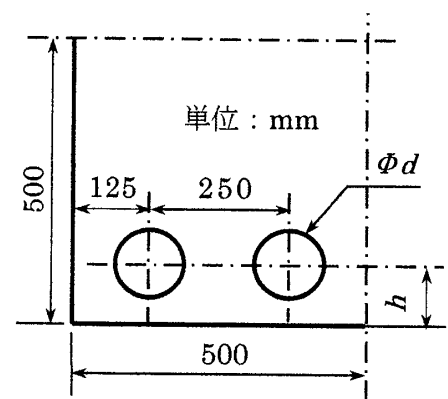


図2 複数円孔の計算モデル

計算対象の試料の弾性係数を30GPa、ポアソン比を0.3とし、図2に示すモデルの穿孔壁に100MPaの一定加重を加え、表1に示す d と h の各ケースについて相当応力の分布を計算した。

表1 穿孔径 d とオフセット h の値 (単位: mm)

d	100	80	50				
h	200	180	160	140	120	100	80

3. 2 計算結果

図3は計算結果の例を示したもので、これらの図は、相当応力の最高値が現れる部分が破壊したものとして、順次計算を繰り返し、各段階の相当応力分布を表したものである。破壊した部分の要素の弾性係数を微小に設定し直し、応力が発生しないようにすることにより破壊を模擬した。相当応力値は図の濃淡の薄いほど大きく、濃いほど小さい。最上段の図は亀裂の入っていない均質媒体の場合の分布図で、下図へ行くほど、破壊領域が大きくなって行き、円孔から放射状に延びた色の薄い部分に亀裂が生じるものと考えられる。

3. 3 計算結果の考察

図3(a)ではオフセットが大きいため、下側の壁面の影響がなく、2孔間を結ぶライン上に亀裂が入って行き、破壊がその方向に生じて大きなブロックが分離されることになる。また逆に図3(b)ではオフセットが小さいため、亀裂の進行が下端面向かうので、2孔間を結ぶ亀裂は発生せず、比較的細かいブロックに破碎されると考えられる。したがって、これらの現象を定量的に把握することができれば、大きなブロックが必要なのか、細かく碎くのかなど、破碎工事の目的に応じて、孔径とオフセットの組合せを決めることが出来る合理的な設計が可能になるものと思われる。

図4は表1に示す全てのケースについて、最初の均質媒体の穿孔壁面に生じる相当応力の最大値をプロットしたものであり、その発生場所を円孔周囲に切欠き印で示してある。この図から、今回計算した条件では、オフセットが120mm以上になると、2円孔間を結ぶライン上に破壊することがわかる。また、オフセットが100mm以下の場合は、装填孔径違いにより、破壊の生じる方向が異なる。すなわち、孔径が小さい場合は2円孔間を結ぶライン上に、また孔径が大きくなれば下壁面の方に向かうところに最大相当応力が発生することがわかる。

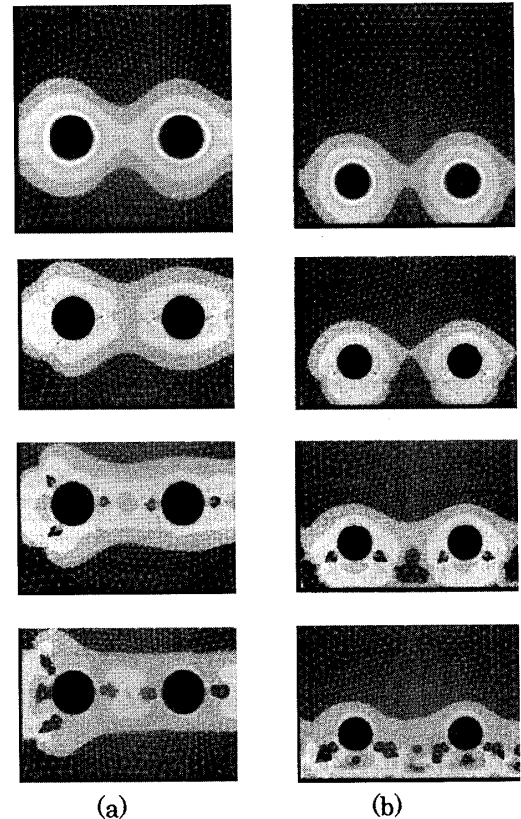


図3 相当応力による破壊領域の進展
(a) $d = 100 \text{ mm}$, $h = 200 \text{ mm}$
(b) $d = 80 \text{ mm}$, $h = 100 \text{ mm}$

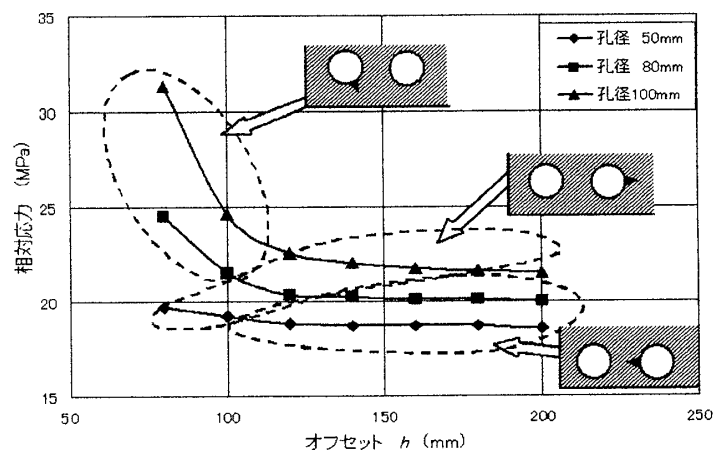


図4 孔壁に現れる最大相当応力およびその位置と孔径およびオフセットの関係

4. 制御板による亀裂制御

4. 1 亀裂制御版

亀裂制御版の形状は図5に示すようにパイプを縦に二つ割りにし、装薬孔の壁面に設置した後、静的破砕剤と水、または水と練り合わせた静的破砕剤を注入する⁶⁾。パイプの材質としては、容易に入手可能なステンレス、アルミニウム、塩化ビニールなどが考えられる。ステンレスは強度があつて亀裂制御には力学的に最も有利であると考えられるが、切断加工が難しく、価格も高い。

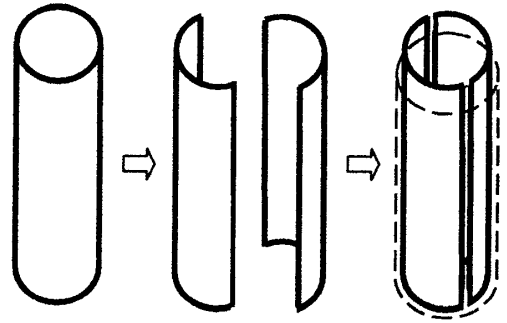


図5 亀裂制御版図

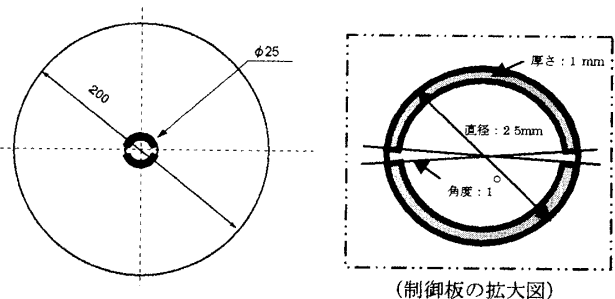
また、塩化ビニール管は安価であり、切断や整形加工も容易であるが、破砕剤の熱によってビニールが解けたり、場合によっては、発火することが考えられる。予備実験の結果、アルミニウムは加工が容易で、ある程度の強度が得られるので、本実験では厚さ1mmのアルミニウム管を用いた。

4. 2 亀裂制御実験と数値シミュレーション

上記の亀裂制御版を用いて亀裂制御の実験を行って、制御版を用いない場合との亀裂の様相を比較した。また、資料の材質はセメントモルタルと石膏を用いた⁷⁾。

有限要素法のメッシュの要素タイプには二次元6節点三角形構造ソリッドを使用し、応力状態は平面歪み、解析応力には相当応力を使用した。この6つの節点で三角形を作る要素タイプはメッシュ分割が細かくできるので、円形モデルなどの分割に適している⁸⁾。

図6は装薬孔に亀裂制御版を入れたときの計算モデルの寸法を示したものであり、2枚の亀裂制御版の隙間の角度は図のように1°とした。

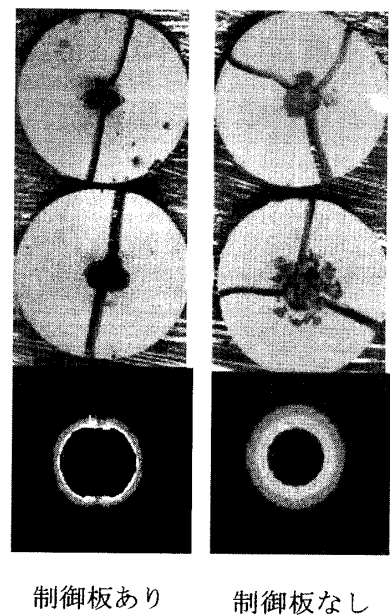


(制御板の拡大図)

図6 亀裂制御版の計算モデル

4. 2. 1 1孔の場合

予備実験で使用したモルタルでは均一でなく亀裂発生にかかる時間もながいため、本研究では硬化時間も短く、加工もしやすく、等方均質性の高い石こうを用いた。基礎的なデータを得るために、直径200mm、厚さ40mmの円柱供試体を複数個作り、その中心に $d=25\text{mm}$ の装薬孔を開け、亀裂制御版を設置したものと、設置しないものを用意し、それぞれ同じ静的破砕剤を充填した。この実験により、発生する亀裂が意図した方向に進展するかどうか、あるいは亀裂の形状はどのように異なるかを観測した。実験及び数値シミュレーションの結果の例を図7に示す。図の右列は亀裂制御版を設置せず、左列は亀裂制御版を設置した場合の写真である。左列の亀裂制御版は装薬孔の左壁面および右壁面に取付け、破断面が写真の上から下に向かって生じることを目論んだものである。



制御板あり 制御板なし

図7 装薬孔が1孔の場合の実験と数値シミュレーションの結果

図の上中段の写真は静的破砕剤を注入して数時間後に破断面が生じた結果の写真である。左列の亀裂制御板を設置した場合は亀裂制御板と平行な方向にのみ破断面が生じていて、所期の目的に達していることがわかる。一方、右列の亀裂制御板を設置しない場合は、当然ながら破断方向の予想は出来ず、この実験例では、3方向に破断しているが、他の実験では2方向、あるいは4方向に破断面が生じた例が見られた。また、この場合、孔口付近の破断面も亀裂制御板を設置した場合より複雑な亀裂が入っていることが多かった。この結果から、亀裂制御板の設置の有効性を認めることができる。下段の図は数値シミュレーションの結果であり、亀裂制御板のない場合は、応力は同心円状に分布しているが、亀裂制御板がある場合は、装薬孔壁の上下にシャープな応力集中が生じていることがわかる。

4. 2. 2 2孔の場合

ここでは、図8に示すような $230\text{mm} \times 180\text{mm} \times 40\text{mm}$ の直方体の供試体を作製し、中央付近に2つの装薬孔を穿ち、亀裂制御板を設置したものを用意し、それぞれの装薬孔に静的破砕剤を充填して、亀裂発生の様相を観察した。なお、亀裂制御板の設置方向が孔列に平行の場合と、垂直の場合の実験を行った。なお、孔径は $d=25\text{mm}$ で固定し、2孔の中心間隔 L は 40mm から 70mm までの値を選んだ。孔径を 25mm に固定したのは、 20mm では破砕剤の量が少ないために亀裂が生じなかったり、結果がでるまで時間がかかりすぎ、逆に 30mm では時間は短くすむが、供試体の寸法との関係で不適当と見なした。

図9は直方体に穿った2孔の装薬孔に静的破砕剤を注入して行った実験の前後の写真と計算による応力分布図である。上段の図は実験前の写真の一例で、左側が亀裂制御板を設置したもので、この写真の左上隅の模式図に示すように、2孔のそれぞれの壁面の左右に亀裂制御板を設置している。これにより2孔の中心を結ぶ直線上に破断面

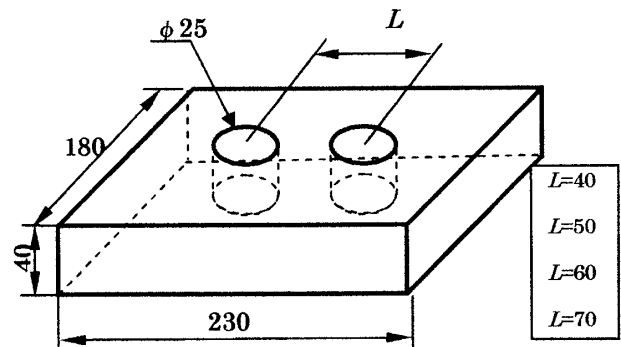
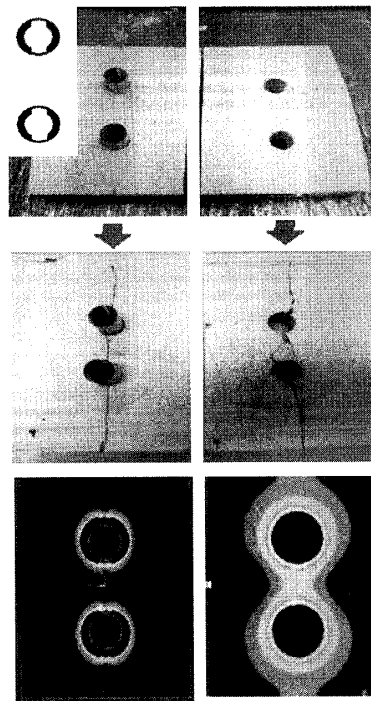


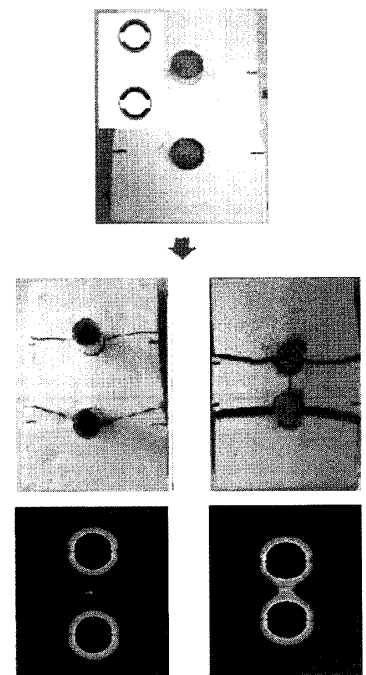
図8 供試体の形状



制御板有り 制御板無し

図9 2孔の一例(1)

上段：実験前
中段：実験後
下段：相当応力分布図



孔間隔：大 孔間隔：小

図10 2孔の一例(2)

上段：実験前
中段：実験後
下段：相当応力分布図

が生じることを期待している。中段の実験後の写真を見ると、右側の亀裂制御板のない場合は、2孔間の領域に複数本の亀裂が見られるなど、比較的複雑な破断面になっている。一方、左側の亀裂制御板を設置した場合の写真では、亀裂がきれいな一本の直線になって破断面が形成されているのがわかる。これらの結果は、下段の相当応力分布図で示されている最高値に近い応力の発生する位置からも推測できる。すなわち、左側の亀裂制御板のある場合には、2孔の中心を結ぶ一直線上の装薬孔壁面に高い応力が集中しているが、右側の亀裂制御板のない場合は、それらが2孔の対面する壁面の広い範囲にわたって現われるに過ぎないことから、亀裂の方向を予測することができると考えられる。

また図10は、亀裂制御板を用いることによって、所定の領域内の亀裂の発生を抑制することが出来るかを調べるための実験の結果である。2孔の装薬孔の中心間隔を変化させ2孔の結ぶ線に対し90°の方向に亀裂が入るように亀裂制御板を設置した。上段の写真は実験前のもので、亀裂制御板の設置方向を示している。中段は実験結果の写真であり、孔間隔が大きいときは制御板の効果が見られるが、孔間隔が小さいときも、孔間に破断面が現われるものの、孔間の外側（写真の上方向と下方向）には破断面は形成されていないことが判り、亀裂の抑制にも有効であることがわかった。下段に示す応力分布図からも、実験結果の妥当性が認められる。

5 おわりに

静的破碎工法において、有限なコンクリート内での円孔間での影響と自由面による影響の関係を解析することにより、円孔の位置によるコンクリートの初期亀裂の場所を推定することができた。これにより、適切な円孔間配置の予測の目安になると思われる。

また、石こうの平板を供試体とし、亀裂制御板を試作して破断面の方向を制御することを目的とした解析と実験を行った。おおむね予想通りの結果を得ることができたが、実用的には、コンクリートや岩石の場合についても実験を行うことが必要であるが、これらの中には等方等質とみなすことが出来るものもあり、ある程度の効果が得られるものと考えられる。今後はモルタルやコンクリートの実寸大の供試体について実験を行い、さらには、碎石現場や、構造物解体現場での実験と解析が望まれる。

参考文献

- 1) 山崎之典 静的破碎剤について；火薬学会誌、48巻、6号、378頁、1987年
- 2) 福井久明、大坂直哉、石田毅：静的破碎剤によるモルタル供試体破壊時のAE測定、火薬学会誌、65巻、1号、21～24頁、2004年
- 3) 福井久明 生石灰を主成分とする静的破碎剤（第1報）：57巻、2号、62頁、1996年
- 4) 静的破碎剤による室内岩石破壊実験 熊大・院 森清隆
- 5) CAD/CAE研究会編：ANSYS工学解析入門、理工学社、2004年
- 6) (株)太平洋マテリアル 静的破碎剤商品説明書
- 7) (株)家庭科学工業 石こう安全データシート
- 8) 5)と同じ

(平成20年3月31日受理)