

自由面発破における自由面形成パターン
の合理的検討手法に関する研究

2016 年 3 月

若 月 和 人

新潟大学大学院 自然科学研究科

自由面発破における自由面形成パターンの 合理的検討手法に関する研究

目 次

第1章 緒 論

1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 論文の内容と構成	9
第1章の参考文献	12

第2章 自由面発破工法の現状と課題

2.1 自由面発破の定義	14
2.2 発破振動低減対策と自由面発破の位置付け	15
(1) 装薬量での対策	15
(2) K値での対策	18
(3) 機械工法の併用（自由面発破工法）	20
2.3 自由面発破の特徴	21
2.4 自由面発破の施工事例	23
(1) 掘削面の中央部に自由面を設ける場合	26
(2) 掘削面の外周部に自由面を設ける場合	29
(3) 中央部と外周部の自由面を組み合わせる場合	31
2.5 横畠トンネルでの施工事例	34
2.6 自由面形成パターンの採用傾向	41
2.7 第2章のまとめ（自由面発破の課題）	42
第2章の参考文献	44

第3章 発破に関する数値解析手法の現状と課題

3.1 発破と数値解析	48
3.2 発破に関する数値解析の現状	49
(1) 連続体解析	49

(2) 不連続体解析	51
3.3 ガス圧の取扱い	55
3.4 第3章のまとめ（数値解析手法における課題）	57
第3章の参考文献	58
第4章 自由面発破に対する数値解析手法の構築	
4.1 概要	61
4.2 個別要素法を用いた数値解析手法の構築	63
(1) 個別要素法の概要	63
(2) 各種エネルギーの評価	64
4.3 解析パラメータ	66
(1) バネ定数	66
(2) 粘性係数	67
4.4 解析条件	69
(1) 要素サイズ	69
(2) 要素分割法	70
(3) 時間増分	71
4.5 ガス圧の取扱い	73
(1) ガスの最大圧力	73
(2) 立ち上がり時間	75
第4章の参考文献	77
第5章 自由面発破の実験と再現解析	
5.1 発破実験の目的	79
5.2 発破実験の概要	80
(1) 実験概要	80
(2) 試験体および発破条件	81
(3) 計測システム	83
5.3 発破実験の結果	85
(1) 破壊状況	85

(2) 加速度	90
5.4 ガス圧の同定	93
(1) ガスの圧力波形	93
(2) 同定手順	94
(2) 同定解析結果	95
5.5 個別要素解析による再現解析	97
(1) 再現解析のモデル	97
(2) 再現解析の結果	98
5.6 第5章のまとめ	104
第5章の参考文献	105

第6章 遠方場における放射波動の伝搬特性

6.1 概要	106
6.2 放射波動の遠方場近似	107
6.3 個別要素解析結果に対する遠方場近似の適用	113
6.4 自由面発破における波動の遠方場特性	115
(1) 解析モデル	115
(2) 放射波動の遠方場特性	116
6.5 境界要素法を用いた波動伝搬特性の検証	120
6.6 理論解によるS波の検証	124
6.7 第6章のまとめ	127
第6章の参考文献	128

第7章 自由面発破の振動低減効果の解明

7.1 概要	129
7.2 通常発破と自由面発破の比較	130
(1) 検討手法	130
(2) モデル化	131
(3) ガス圧	131
7.3 最小抵抗線長を変えた場合の解析結果	134

(1) 破壊状況	134
(2) 各種エネルギー	137
(3) 発破効率	144
(4) 放射波動の遠方場近似	145
7.4 第7章のまとめ	149
第7章の参考文献	151
第8章 合理的な自由面形成パターンの検討	
8.1 概要	152
8.2 自由面発破パターンの比較	153
(1) 検討ケース	153
(2) モデル化	153
8.3 自由面長を変えた場合の解析結果	154
(1) 破壊状況	154
(2) 各種エネルギー	159
(3) 発破効率	166
(4) 放射波動の遠方場近似	167
8.4 第8章のまとめ	171
第9章 結 論	
9.1 本研究のまとめ	173
9.2 今後の展望	178
謝 辞	181

第1章

緒 論

1.1 本研究の背景と目的

山岳トンネル工事は、シールドトンネルや開削トンネルとは異なり、山間地域で建設されるケースが多い。土砂地山から硬岩地山にわたる幅広い地質に対して、爆薬や大型施工機械を用いることで効率的な施工が可能なために経済的なトンネル建設が可能であることや、地質変化や湧水およびトンネル断面の変化等に対して比較的容易に対処できるため、これらの点において他のトンネル工法と比較して有利であり、多用されている。

近年、社会基盤整備の進展や、トンネル施工技術の向上に伴って、民家や重要構造物などの制約物件と近接してトンネルを建設するなど、これまでであれば行なわれなかったであろう施工条件の厳しい条件においても、山岳トンネルが適用されるケースが増加している。とくに、民家や重要構造物等の制約物件と近接してトンネル工事を計画する場合、騒音や振動の問題が顕在化し、これらへの対応を求められることが多くなっている。

トンネル工事における騒音および振動の問題は、おもにトンネル本体工事および仮設備から発生する。このうち、仮設備からの騒音に対しては、音源対策（低騒音機械の使用等）や伝搬経路対策（おもに防音壁の設置）を行なうことによって、ほとんどの場合は解決することができる。また、仮設備からの振動については問題になることはほとんどない。一方、トンネル本体工事からの騒音および振動に対しては、トンネル掘削方式の選定も含めて対策を検討する必要がある。

山岳トンネル工事における掘削方式は、一般に人力掘削、発破掘削方式および機械掘削方式に大別される（図1.1）。人力掘削は、他の掘削方式と比較して施工性や安全性の面で劣り、低強度の地山で小規模な施工を部分的に行うなど特殊なケースを除き、現在の山岳トンネルの施工において採用されることはないため、ここでは取り上げない。

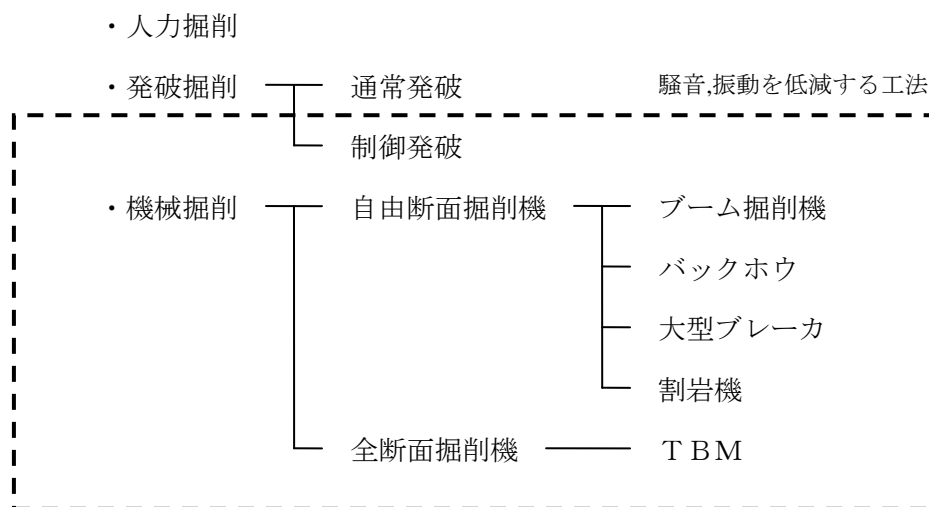


図 1.1 掘削方式の分類



写真 1.1 発破掘削（爆薬装填状況）



写真 1.2 機械掘削（自由断面掘削機）

発破掘削は、ドリルジャンボを用いて装薬孔を削孔し、ここに爆薬を装填して岩盤を破壊することによって掘削を行う方法である（写真1.1）。硬岩から軟岩まで幅広い地山に対応でき、地質変化の激しい地山でも比較的容易に対応でき、効率と経済性の面で他方式より有利な場合が多い。ただし、不良地山や土被りの小さな地山では、周辺地山を必要以上に緩めたり、場合によっては天端崩落や地表面の陥没を引き起こしたりすることが懸念される。また、発破に伴って発生する騒音や振動が周辺環境に大きな影響を与えることも懸念される。

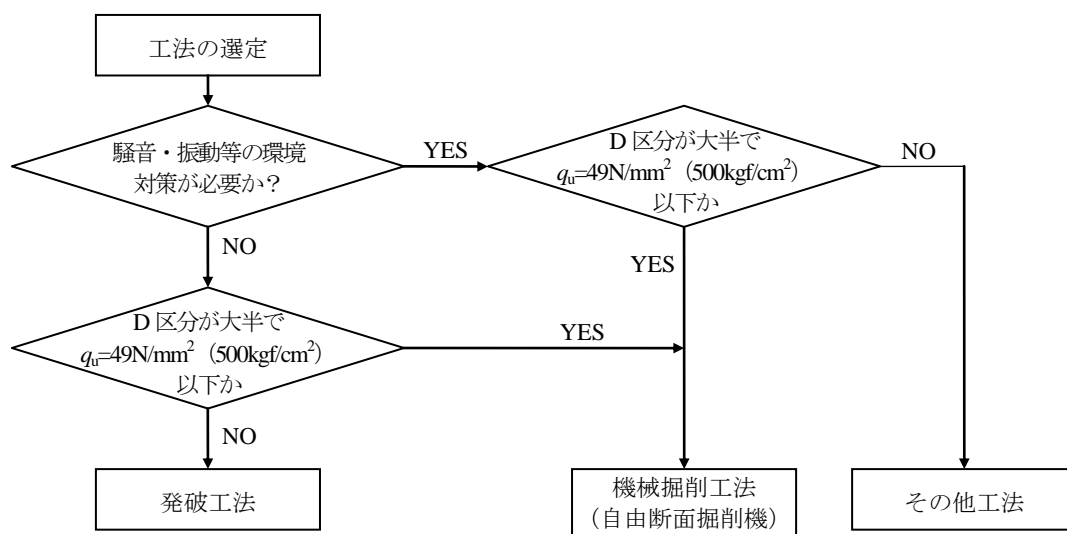
このうち、発破騒音に対しては伝搬経路対策（おもに防音扉）が有効であり、効果的に騒音を低減することが可能である¹⁾。防音扉のグレードや枚数によって、おおむね十分な対策効果を得ることができている。一方の発破振動に対しては、伝搬経路対策の実施は困

難であり、通常は振源対策が行なわれている。すなわち、発破振動を低減する制御発破あるいは機械掘削等の無発破掘削方式への変更である²⁾。以降、発破振動の低減方法に限定して説明する。

発破掘削で振動を低減する場合、雷管の種類や段数の変更、心抜き対策、分割発破あるいは爆薬の種類変更といった、いわゆる制御発破を採用することが基本的な対策である³⁾。もともと発破掘削で施工している場合、比較的容易に採用できるうえ、適切な計画であればある程度の振動低減効果が期待できる。しかしながら、その効果にはおのずと限界がある。このため、厳しい環境条件が付される場合は発破掘削の採用が困難となる。

一方の機械掘削（写真1.2）は、ブーム掘削機や大型ブレーカ等の自由断面掘削機や、TBM（Tunnel Boring Machine）に代表される全断面掘削機を用いて掘削する方法である。土砂等の不良地山や軟岩地山といった比較的地山強度の低い地山において、効率的に掘削することが可能である。また、発破振動が発生しないため、周辺環境に対する問題が発生しにくい。機械掘削の場合の地盤振動についてはあまり報告事例が無いが、同距離における発破掘削の振動と比較して一桁は十分に小さい（1/10程度以下）とされている⁴⁾。このため、機械掘削を採用することで、地盤振動の問題はほとんど発生しない。しかしながら、機械掘削の場合、地山の硬軟によって掘削効率が大きく左右される。

発破掘削とすべきか、機械掘削とすべきか、掘削方式の選定にあたり、国土交通省土木工事積算基準⁵⁾ではその基本的な考え方を示している（図1.2）。



(注) 大半の区分は 90%程度を目安とする。

図 1.2 掘削方式の選定フロー⁵⁾

ここでは、地山条件（強度、亀裂、地質、湧水等）や環境条件に応じて選定することとしており、機械掘削を効率的に適用できる範囲として、地山の一軸圧縮強度がおおむね 49N/mm^2 (500kgf/cm^2) 以下と設定している。

近年、周辺環境に対する要求が高まるなか、従来よりも硬質な地山への対応を図るために掘削機械の開発が進められ実施工に導入されており^{6),7),8)}、自由断面掘削機によるトンネル掘削は近年増加傾向にある⁹⁾。しかしながら、硬岩および中硬岩地山に対しては、極端に掘削効率が低下あるいは掘削自体が不可能となるだけでなく、コスト上の問題も残るなど、まだまだ問題を抱えている。

これに対して、通常の機械掘削の適用が困難な硬岩あるいは中硬岩地山において、周辺環境対策を行なう必要のある場合を対象として、1980年代中頃、機械掘削の一種である割岩工法が開発された（図1.3、写真1.3）。割岩工法は、掘削面に対して専用機あるいはドリルジャンボを用いて連続孔を形成してこれを自由面（スロット）とし（図1.4）、油圧くさびや静的破砕剤を使用して岩盤に引張応力を作用させることで亀裂を発生させ、最終的には大型ブレイカで岩盤を掘削する工法である。これまでにSD工法¹⁰⁾、FONドリル工法¹¹⁾、EG-Slitter¹²⁾、エルエスカッター工法¹³⁾等の工法が開発されており、これまでに数多くの施工実績を残してきている。

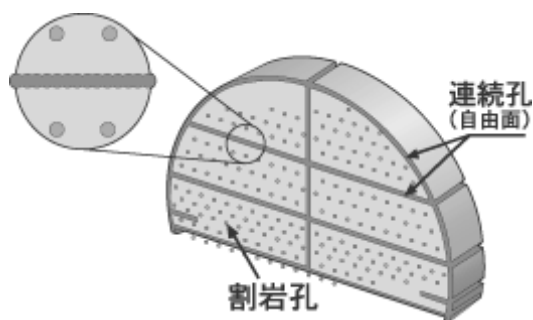


図 1.3 割岩工法¹⁴⁾



写真 1.3 割岩工法による掘削状況¹⁴⁾

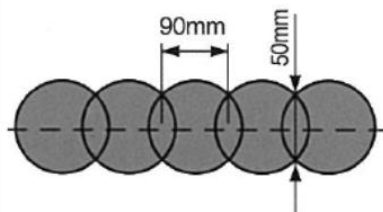


図 1.4 連続孔による自由面のイメージ¹⁴⁾

割岩工法では、連続孔によって2自由面以上の状態を造りだすことで、硬岩および中硬岩地山においても効果的な岩盤破碎が可能となり、同時に、発破騒音および振動を無くすることができる。

しかしながら、割岩工法で連続孔の穿孔作業に長時間を要するため、サイクルタイムが延びて工程に影響を及ぼすとともに、掘削コストが大幅に増加するという大きなデメリットがある。たとえば、一般的な掘削幅11m程度の2車線道路トンネルを想定し、通常の出破掘削と割岩掘削とで掘進速度および掘削コストについて試算し比較すると、表1.1および表1.2に示すとおりである。このように割岩掘削は、効率および経済性の面で著しく不利である。このため、これらのデメリットを許容できる特殊な事情が存在する場合でないと採用が困難である。

表1.1 出破掘削と割岩掘削の掘進速度

	出破	割岩
掘削・支保C I	約 4.0m/日	約 1.0 m/日
掘削・支保C II	約 3.4 m/日	約 0.9 m/日

表1.2 出破掘削と割岩掘削のコスト

	出破	割岩
掘削・支保C I	約¥460,000/m	約¥2,720,000/m
掘削・支保C II	約¥640,000/m	約¥2,990,000/m

出破掘削：国土交通省土木工事積算基準に準拠⁵⁾
 割岩掘削：FON工法 技術・積算資料に準拠¹⁵⁾

割岩工法その他、アブレイシブジェット¹⁶⁾、放電衝撃^{17),18),19)}およびレーザー²⁰⁾等の無出破掘削工法の開発も行われているが、サイクルタイムやコストの面のみならず、掘削能力の面で問題が残っている。今後のさらなる技術開発の進展が望まれる。

このような背景のもと、出破掘削と割岩工法の間間的な位置づけとして、割岩工法で使用する自由面形成技術を利用して、掘削面の中央部や外周部に自由面（スロット）を形成させて大幅に振動を低減させる出破（以下、自由面出破と呼ぶ）が適用されるようになって

てきた（写真1.4）。

自由面を追加することで発破振動を低減しようとする方法は、割岩工法の出現以前からも、掘削面にプレスプリット²¹⁾やバーンホール（通称、ばか穴）²²⁾を設ける形で試行されることはあった。しかしながら、自由面としての効果は限定的であり²²⁾、あくまでも補助的な対策にとどまっていると思われる。これは、自由面の規模が小さいために、ロックブリッジ（自由面が連続せずに残る中壁）によって振動が伝達されてしまうためと考えられる。これに対して自由面発破は、割岩工法の開発に伴って十分な規模の自由面を効率的に形成することが容易になったため、その効果が確認されるにしたがって普及するようになったと考えられる。このため、自由面の形成には、割岩工法の技術を利用する方法が多いが、この他にもTBMや割岩工法で自由面を設ける場合もあり、ここではこれらも自由面発破に含めて考えることとする。

自由面発破のおおまかな適用範囲を図1.5に示す。



写真 1.4 自由面発破のための自由面（スロット）形成状況

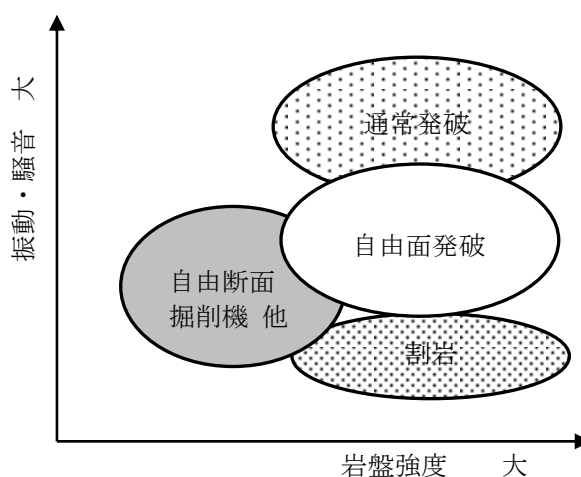


図 1.5 掘削方式の適用範囲²⁴⁾

既往の自由面発破の施工実績では、すべての事例で高い振動低減効果があったと報告されており、その有用性が確認されている。一般に、発破振動の検討において、振動速度 V の推定には、発破係数 K 、装薬量 W 、距離 D 、指数 m, n を用いて以下の経験式²⁵⁾が使用されている。

$$V = K \cdot W^m \cdot D^{-n} \quad (1.1)$$

これをふまえ、既往の自由面発破を実施した実績では、装薬量および K 値が低減された結果として発破振動が低減されたと報告されている^{26), 27)}。岩盤を破碎する場合、自由面の存在がきわめて重要であり、自由面を形成することによって発破の負荷が軽減されて装薬量および K 値が低減されたものと理解される。

ただし、これらの効果は概念的な議論にとどまっており、振動低減効果の定性的かつ定量的な議論が十分になされていない。このため、自由面の形成には多大なコストと時間を要することから、最小規模の自由面で最大限の振動低減効果を得ることが施工上の課題となるが、掘削面のどの部分にどのような形状の自由面を形成すれば良いのかを合理的に決定する方法は今のところ存在しない。また、最適な自由面のパターンを経験的に設計できるほどの施工実績の蓄積はなく、事前に多数の自由面パターンについて試験施工を行なうことも現実的ではない。このため、自由面発破パターンの合理的な設計手法の確立が望まれる。

他方、自由面発破の施工実績は、報告されているだけでも現在までに30件を超えており、現在も増加傾向にはあるが、採用頻度はそれほど高くないと言える。これに対して、割岩工法の採用件数は90件を超えている。歴史的に同様な両工法であるにもかかわらず、自由面発破の採用頻度は割岩の約1/3である。地元住民の了解が得られずに発破の適用ができないなど、ケース毎に制約条件が異なるため、単純に比較することはできないものの、経済的に不利なはずの割岩工法と比較して自由面発破の採用頻度は低い。

この要因として、まず、自由面発破の認知度が低いことが挙げられる。山岳トンネルの設計や施工計画の際に参考とする基準類（たとえば、トンネル標準示方書²⁸⁾、道路トンネル技術基準²⁹⁾および各起業者の設計基準書³⁰⁾等）に自由面発破の記述は存在していないが、割岩工法の記述は少ないながらも存在している。このため、高いレベルでの振動低減対策が求められる場合、一足飛びに割岩工法が採用されることも想定される。さらに、自由面

発破における自由面形成パターンについて標準的な考え方が存在していないことも挙げられる。

近年、住民意識の変化等に伴い、これまで以上に周辺環境の維持が求められているが、同時に、昨今の我が国の財政状況を考慮し、国民の理解のもとで社会資本整備を進めていくために、限られた予算の効率的かつ効果的な活用も求められている。一般的に、環境の維持と経済性の追求は相反するテーマであるが、これらをバランスさせて解決することが求められるようになってきている。

自由面発破は、割岩工法と比較して効率的かつ経済的であり、しかも高い振動低減効果を併せ持つ工法であることから、周辺環境の維持と経済性の両立が求められる状況にあって、普及が望まれる工法の一つと考える。

本研究は、上述したようなトンネル建設にかかわる状況をふまえ、自由面を併用した低振動発破に対して、経験や過去事例に依るだけでなく、振動低減のメカニズムをふまえて合理的な自由面発破の設計手法確立を目的としたものである。

1.2 論文の内容と構成

本論文は、以下に示す全 9 章で構成されている。

- 第 1 章 緒論
- 第 2 章 自由面発破工法の現状と課題
- 第 3 章 発破に関する数値解析手法の現状と課題
- 第 4 章 自由面発破に対する数値解析手法の構築
- 第 5 章 自由面発破の実挙動と再現解析
- 第 6 章 遠方場における放射波動
- 第 7 章 自由面発破の振動低減効果の解明
- 第 8 章 合理的な自由面形成パターンの検討
- 第 9 章 結論

各章の概要を以下に示す。

「第 1 章 緒論」では、山岳トンネルにおける自由面発破の位置付けと本論文の意義について概説した。

「第 2 章 自由面発破工法の現状と課題」では、論文や専門誌等で発表された自由面発破の施工事例を収集し、他の掘削方式と比較した際の特質、自由面発破工法の種類や考え方、および現状における問題点について整理した。とくに、自由面による振動低減のメカニズムが明らかでないため、現状では自由面発破の合理的な設計ができていないことを示した。

「第 3 章 発破に関する数値解析手法の現状と課題」では、既往の発破問題に対する数値解析の適用事例について調査し、自由面発破工法に適用する際の問題点について整理した。

「第 4 章 自由面発破に対する数値解析手法の構築」では、自由面発破における破壊と振動の両者を評価するための手法として個別要素解析手法を選定し、第 3 章で示した発破問題における数値解析手法の課題をふまえて、その解析手法を構築した。

「第 5 章 自由面発破の実験と再現解析」では、自由面発破の実挙動を把握するために行った、コンクリート試験体を用いた発破実験の結果を示した。ここでは主に、発破孔

近傍の破壊挙動，振動伝搬傾向，およびガス圧に着目し，これまで必ずしも明確ではなかった自由面発破の実挙動を明らかにした。

さらに，この実験結果に対して，**第4章**の数値解析手法を用いた再現解析を実施することで解析手法の検証を行なった。パラメータを適切に設定することにより，当該解析手法が自由面発破に対して高い適用性を有することを確認した。

「**第6章 遠方場における放射波動**」では，波動伝搬特性についての考察を進めるため，発破孔から放射される波動に対して遠方場近似の考え方を適用した。自由面が存在することによって，放射波動の伝搬特性に特徴的な方向性が現れることを示し，自由面の形成パターンによって効率的に振動低減できる可能性を示した。

「**第7章 自由面発破の振動低減効果の解明**」では，**4～6章**で示した解析手法を適用し，自由面の無い通常の発破と自由面発破とを比較することにより，これまで必ずしも明らかにされていなかった自由面発破における振動低減効果のメカニズムについて考察した。

「**第8章 合理的な自由面形成パターンの検討**」では，最小抵抗線長と自由面長を変化させたケーススタディを行い，自由面発破パターンの違いが破壊状況や放射波動に与える影響について検討し，合理的な自由面形成パターンを設定するために参考となる基本的な考え方について解析結果にもとづいて考察した。

「**第9章 結論**」では，本論文の総括として，自由面発破における合理的な自由面形成パターンに資するために実施した研究成果を整理した。さらに，今後の課題について言及した。

本論文の構成イメージを図1.6に示す。

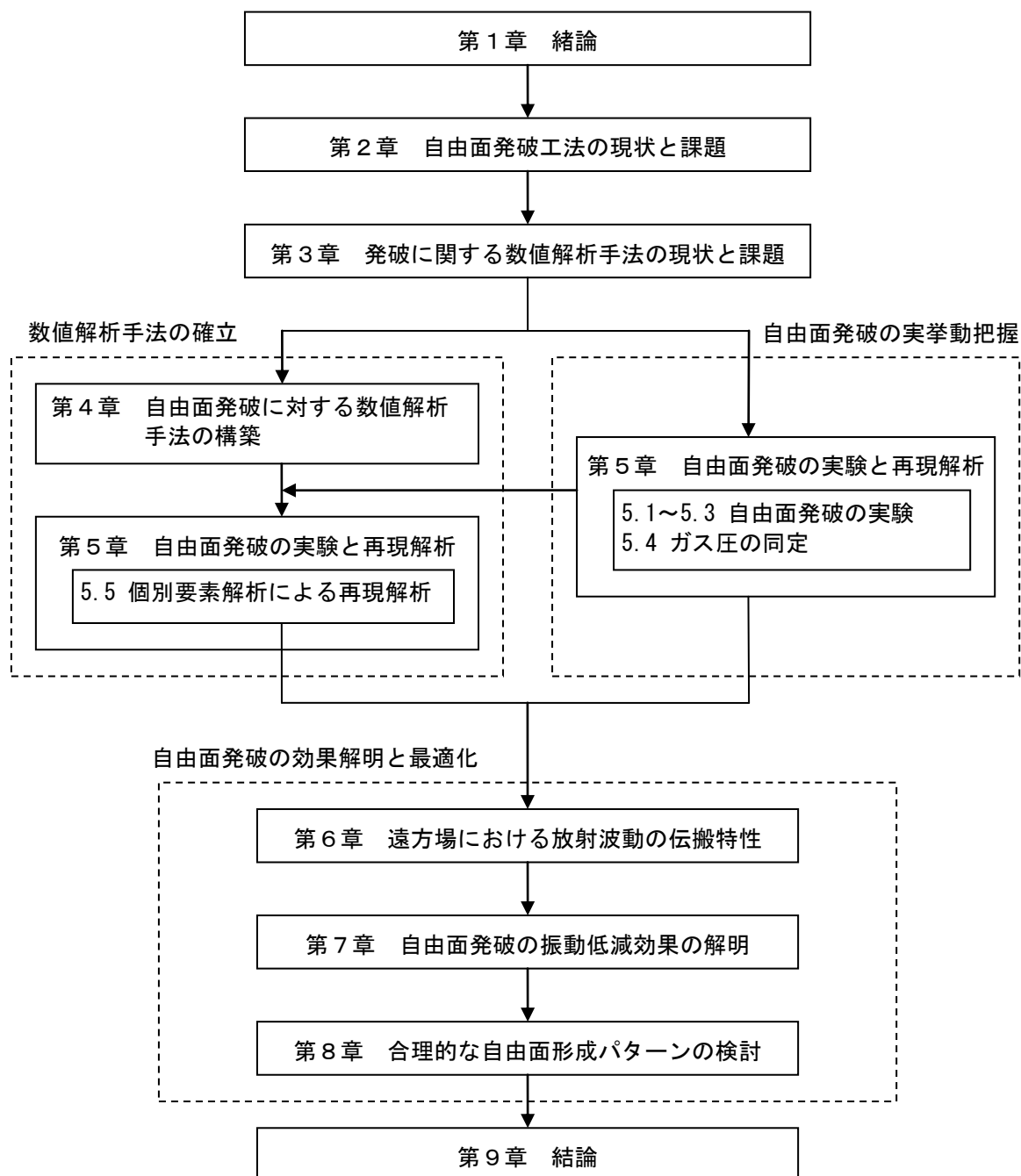


図 1.6 本論文の構成イメージ

第 1 章の参考文献

- 1) 社団法人 火薬学会 発破専門部会：現場技術者のための発破工学ハンドブック，共立出版，p.463，2001.
- 2) ジェオフロンテ研究会：現場技術者のための制御発破工法の実際一発破による騒音や振動を制御する技術資料一，p.104，1996.
- 3) 日本火薬工業会：あんな発破こんな発破 発破事例集，2002.
- 4) ジェオフロンテ研究会：トンネル掘削にブレイカーを適用する場合の環境影響評価その他諸問題の検討ーイタリアの実績（文献紹介）を中心にー，1993.
- 5) 一般財団法人 建設物価調査会：平成 26 年度 国土交通省土木工事標準積算基準書（河川・道路編）
- 6) 横井忠，伊藤利雄，川下美継，田中康弘：超大型ブレイカで中硬岩地山に挑む 一般国道 55 号 大砂トンネル，トンネルと地下，Vol.26，No.1，pp.7-13，1995.
- 7) 宇都暢生，莊子幸弘，橋詰順一，松藤孝弥：環境を考慮して機械掘削を採用 九州新幹線 玉名トンネル北工区，トンネルと地下，Vol.32，No.11，pp.7-13，2001.
- 8) 宮本義広，藤井康男，田村壽夫，白川賢志：超大型自由断面掘削機により硬岩地山に挑む 阪神高速道路神戸山手線 高取山工区（北行）トンネル，トンネルと地下，Vol.27，No.10，pp.15-23，1996.
- 9) 石田義昭，永田亮，登坂知平，今井英雄，大山宏：低騒音・低振動掘削工法（7）自由断面掘削機の現状と施工事例，トンネルと地下，Vol.24，No.10，pp.71-77，1993.
- 10) 本田裕夫，萩森健治，古川浩平，中川浩二：硬岩トンネルの無発破掘削に関する研究，土木学会論文集，No.379/VI-6，pp.55-64，1987.
- 11) 野間達也，土屋敏郎，波田光敬：新しい自由面形成と割岩方法による硬岩トンネルの機械化掘削，土木学会論文集，No.567/VI-35，pp.81-90，1997.
- 12) 原敏昭，多田幸司，熊谷成之，木村哲，平野享，山下雅之，塚田純一，金子勝比古：割岩工法における新しい自由面形成方法の提案，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.59，VI-391，pp.779-780，2004.
- 13) 本田豊光，山下正治，山森和博：佐賀 497 号 山彦トンネル新設工事，臨床トンネル工学，Vol.28，pp.47-56，2011.
- 14) F O N 工法協会：F O N 工法技術資料
- 15) F O N 工法協会：F O N 工法 技術・積算資料，平成 23 年改訂.
- 16) 蓮井昭則，世一英俊，山下亮：アブレイシブジェットと膨張性破砕剤を併用したトンネル掘削について，岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，Vol.19，pp.356-360，1987.
- 17) 荒井浩成，大工博之，塚原正徳，井上鉄也，前畑英彦：放電衝撃圧を利用した岩石破壊法の検討，岩

- 盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.26, pp.261-265, 1995.
- 18) 川井洋二, 八島明生, 青木竜一, 笠博義, 荒井浩成: 放電衝撃破碎とブレーカ掘削による避難連絡坑の掘削, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.13, pp.181-184, 2003.
- 19) 藤原一博, 作原陽一: PAB 工法 (プラズマによる岩破碎技術), 建設機械, Vol.39, No.10, pp.15-18, 2003.
- 20) 高谷透, 里優, 福井勝則, 大久保誠介: CO₂ レーザを用いた岩盤掘削の基礎実験, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.27, pp.86-90, 1996.
- 21) 橋本博: ABS 工法によるラインカット法とスミーズプラスチング法, とびしま技報, No.22, pp.144-157, 1979.
- 22) 土木学会: トンネル用語辞典 2013 年版, 2013.
- 23) 齋藤優, 若月和人, 阿部和久, 紅露一寛: 空孔配置によるトンネル発破振動低減効果の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69, CS11-027, 2014.
- 24) ジェオフロンテ研究会 割岩工法 WG: 割岩工法便覧 割岩工法に関する技術資料 (総集編), p.1, 2006.
- 25) 日本トンネル技術協会: トンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査研究報告書, pp.21-22, 1977.
- 26) 萩森健治, 竹知芳男, 古川浩平, 中川浩二: スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究, 土木学会論文集, 第 391 号/VI-8, pp.142-150, 1988.
- 27) 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, 土木学会年次学術講演会, Vol.66, VI-387, 2011.
- 28) 土木学会トンネル工学委員会: 2006 年制定 トンネル標準示方書 山岳工法・同解説, 2006.
- 29) 日本道路協会: 道路トンネル技術基準 (構造編)・同解説, 丸善出版, 2003.
- 30) 東, 中, 西日本高速道路株式会社: 設計要領第三集 トンネル編, 2014.

第2章

自由面発破工法の現状と課題

2.1 自由面発破の定義

前章で述べた「割岩工法で使用する自由面形成技術を利用して、掘削面の中央部や外周部に自由面（スロット）を形成させて大幅に振動を低減させる発破」については、現在のところ統一的な名称はないように思われる。

山岳トンネルの発破掘削では、掘削面が既に自由面であるため通常の発破は厳密には1自由面発破であり、明かり掘削のベンチカットのように上面と側面のように2つの自由面を有する場合の発破は2自由面発破である¹⁾。したがって、連続孔等によって掘削面に自由面を追加する発破のことは2自由面発破と呼ぶこともできる。ただし、1自由面発破はあくまでも標準的な発破方法であるため、本論文では、自由面が2つ以上存在する発破のことを自由面発破と呼ぶこととする（図2.1）。

なお、割岩工法併用発破²⁾、無発破工法を併用した発破工法³⁾、あるいは破砕帯を設ける方法⁴⁾と呼ばれることもある。ただし、本論文で対象とする自由面発破は、割岩工法の要素技術を用いるものであり、必ずしも割岩工法を併用するわけではない。同様に、TBMなど無発破工法を併用する場合もあるが、連続孔を用いる場合は無発破工法自体を併用するわけではない。また、破砕帯についても、自由面発破の効果は振動を遮断する効果のみでは説明できない。したがって、これらの呼び方については、本論文では採用しないこととする。

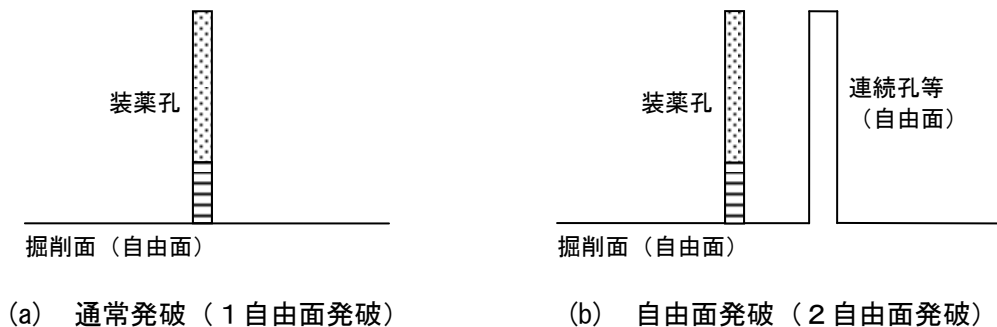


図 2.1 発破孔と自由面の関係

2.2 発破振動低減対策と自由面発破の位置づけ

周辺環境対策として発破振動を低減する場合の対策を表2.1に示す。発破振動の低減対策は、おもに(1)装薬量での対策、(2) K 値での対策、および(3)機械工法の併用（自由面発破工法）の3つに大別することができる⁵⁾。

表2.1 発破振動を低減させる方法の概要

区 分	方 法
装薬量での対策	多段発化による斉発薬量の低減
	DS+MS雷管，導火管付き雷管，電子雷管
	発破規模の縮小
	進行長を短くする方法 切羽を分割する方法
K 値での対策	薬種の変更
	心抜き方法の変更
機械工法の併用 (自由面発破工法)	TBM等の機械や、連続孔（スロット）により 中央部や外周部に自由面を形成する

以下、各方法について概説する。

(1) 装薬量での対策

1) 多段発化による斉発薬量の低減

式(1.1)に示されるとおり，発破振動は装薬量（1段あたりの装薬量：斉発薬量）に比例する。したがって，多段発破を採用して斉発薬量を低減することは，発破振動の低減対策として最も基本的かつ効果的な対策である。標準的な発破はD S 雷管の10段使用である⁶⁾が，これは発破振動の低減に特段の配慮を行なったものではない。一般的には，使用する雷管の段数を増加することによって対応されている。

現在，国内で使用できる雷管の種類と，それを用いた多段発破の特徴について表2.2に記述する。

表2.2 多段発破の方法

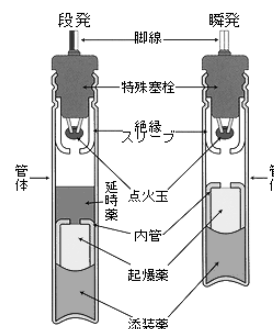
雷管種類	特 徴
D S 雷管 D S + M S 雷管	D S 雷管単独では20段まで、D S とM S 雷管を組み合わせると25～30段程度 ⁴⁾ の多段発破が可能となる。ただし、起爆秒時精度の問題から、振動波形を分離できない場合もある。
導火管付き雷管	導火管付き雷管とコネクタ（結線用雷管）を組み合わせることにより、トンネルでは100段程度 ⁴⁾ の多段発破が可能である。
電子雷管	I C タイマーを用いた高精度電気雷管であり、起爆秒時精度がきわめて高いため、1孔1段の多段発破が可能である。トンネル用では30ms間隔で200段が標準仕様である ⁷⁾ 。

・ D S 雷管およびM S 雷管

D S 雷管およびM S 雷管（電気雷管）は、脚線を通じて流した電流によって起爆薬および添装薬を爆発させ、この爆ごう衝撃によって爆薬を起爆させるものである（写真2.1，図2.2）。段発雷管の秒時差は、起爆薬の手前に延時薬を挟むことにより、一定時間の遅延を実現している。ただし、この延時薬に起因して秒時誤差が発生することに留意する必要がある。

D S 雷管の秒時差は最小250msと比較的長いため、振動波形の分離が容易であり、段数増加の効果は高いが、単独では最大20段までとなる。これより段数を増加させたい場合は、D S 雷管とM S 雷管を組み合わせることができる。ただし、M S 雷管の秒時差は最小25msと短く、振動継続時間、秒時差および秒時誤差を考慮して各段の振動波形が緩衝しないようにすると、25～30段程度の段発発破が上限である。

これ以上の段数増加が必要な場合、導火管付き雷管あるいは電子雷管を使用する。

写真 2.1 電気雷管の例⁸⁾図 2.2 電気雷管の構造⁸⁾

- 導火管付き雷管

導火管付き雷管は、通常で使用する発破母線の代わりに、内壁に反応剤を付着させたプラスチックチューブ内に衝撃波を送ることで雷管を起爆する非電気式雷管である（写真2.2、図2.3）。導火管付き雷管は、電気雷管より秒時誤差が小さく、斉発性が高い。また、導火管付き雷管とコネクタを組み合わせることにより、トンネル発破の場合で100段程度の段発が可能である。

施工面においては、非電気式であるため静電気や漏洩電流等に対して安全性が高い。ただし、装薬方法が電気雷管と異なり煩雑となるため、装薬管理に配慮が必要である。

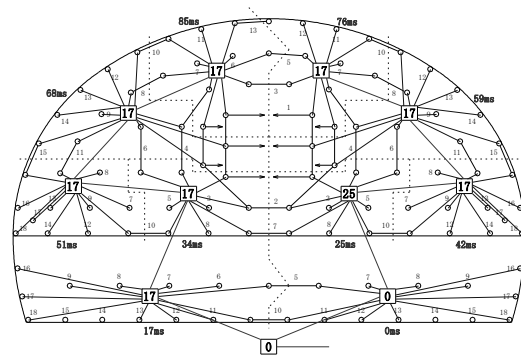
写真 2.2 導火管付き雷管とコネクタの例⁸⁾

図 2.3 導火管付き雷管を用いた発破パターンの例

- 電子雷管

電子雷管は、ICタイマーで起爆秒時を高精度に制御した高性能電気雷管である（写真2.3、図2.4）。トンネル発破の場合200段程度の段発が可能である。また、起爆秒時差を1ms刻みで任意に設定でき、秒時誤差もほとんどない（0.2ms以内）ため、振動波形の分離に有効である。ただし、装薬方法が電気雷管と異なり煩雑となるため、装薬管理に配慮が必要である。

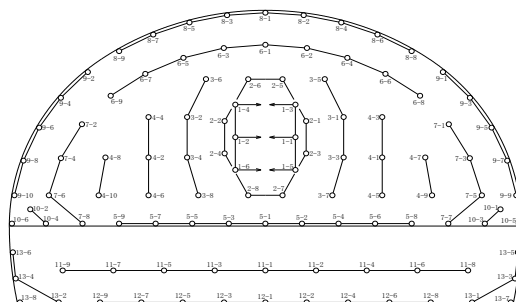
写真 2.3 電子雷管の例⁹⁾

図 2.4 電子雷管を用いた1孔1段発破パターンの例

D S 雷管あるいはD S + M S 雷管が比較的短時間に発破が完了するのに対して、導火管付き雷管および電子雷管の場合、段数の増加に伴って発破の継続時間が長くなるため、これに伴う苦情が地元住民から発生することもある。また、雷管のコストが高いため経済性が大きく低下する。

2) 発破規模の縮小

・ 進行長を短くする方法

支保パターンによって決まっている1発破進行長(1.0～2.0m)を短くすることによって、1回あたりの装薬量を少なくし、斉発薬量を低減させるものである。ただし、掘削速度が低下するに伴って掘削コストも増大するため、一般的には、1)の雷管段数の増加では対応が困難な場合に採用されることが考えられる。

・ 切羽を分割する方法

切羽をいくつかのブロックに分けて分割発破を行うことで、1回あたりの装薬量を少なくし、斉発薬量を低減させるものである。得失は、2)の1発破進行長を短くする方法と同様である。

(2) K値での対策

式(1.1)のK値は、薬量および距離以外の様々な要因によって構成されている。雑喉¹⁰⁾は、K値を下式および表2.3に示す $C_1 \sim C_5$ の5つの要素により構成されるとしている。

$$K = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \quad (2.1)$$

表2.3 K値を構成する要素

C_1	ベンチカット発破、トンネル掘進発破など発破の種別によって定まる要素。
C_2	発破のかかり方(破碎効果)の良否によって変わる要素。適正発破の場合を1とすると、総薬量に比して抵抗線の大きい発破(弱装薬)の場合は $C_2 > 1$ 、逆に抵抗線の小さい発破(過装薬)のときは $C_2 < 1$ となる。
C_3	受振点の地盤状況の差異によって変わる要素。堅硬な岩盤の場合を1とする。岩盤上に表層が存在する場合は $C_3 > 1$ となり、表層が厚層あるいは軟弱質であるにしたがって C_3 の値は大となる。
C_4	装薬された爆薬の種類の差による要素。通常の爆薬を1とする。低爆速爆薬の場合は $C_4 < 1$ 。
C_5	発破域に対する受振地の方向の差により変わる要素。発破域の後面を標準とすると、前面の場合は一般に $C_5 < 1$ 。

C_3 および C_5 はコントロールできない固有の要因であるため、ここでは K 値の低減に繋がる C_1 、 C_2 および C_4 について以下に示す。

1) 薬種の変更

式(2.1)の C_4 に相当する。一般に、爆ごう圧力の立ち上がり時間が短く爆速が速いほど、発生する振動は大きくなるため、低爆速の爆薬を使用することは振動の低減に有効である。

2) 心抜き方法の変更

心抜きパターンの変更は、式(2.1)の C_1 および C_2 に相当する。トンネル発破では、心抜き部で負荷が大きくなるため、通常、心抜き発破でもっとも大きな振動が発生する。一般に広く採用されている心抜きパターンはVカットであるが、心抜きに対しては、単純に斉発薬量を低減すると岩盤が有効に破砕されず、逆に振動が大きくなることも考えられる。このため、心抜き発破の振動を低減するために、心抜きパターンを変更する各種方法が行なわれている。

なお、トンネル掘削における心抜きの効率的なパターンは経験的に確立されてきており、Vカットおよび平行心抜きに集約される¹¹⁾。心抜きパターンの例を図2.5に示す。以下、この2つのパターンをもとにした振動低減のための心抜きパターンについて記述する。

・ダブルVカット

補助心抜きを設けたダブルVカットでは、補助心抜きによって本心抜きの負荷が軽くなるため、 C_1 および C_2 の低減に伴って K 値の低減が可能となる。ダブルVカットを採用したことにより、標準的なVカットと比較して K 値を30～50%程度低減できたとする実績が報告されている¹²⁾。

・平行心抜き（バーンカット、シリンダカット）

心抜き部の中心にφ50～100mm程度の空孔を設ける平行心抜きでは、空孔が自由面の役割をはたすことにより K 値の低減が可能となる。ここで、空孔と装薬孔が同一径のものはバーンカット、大口径の空孔を設けたものはシリンダカット（大口径バーンカット）と呼ばれている。平行心抜きとすることにより、標準的なVカットと比較して K 値を40～50%低減できたとする実績も報告されている¹²⁾。

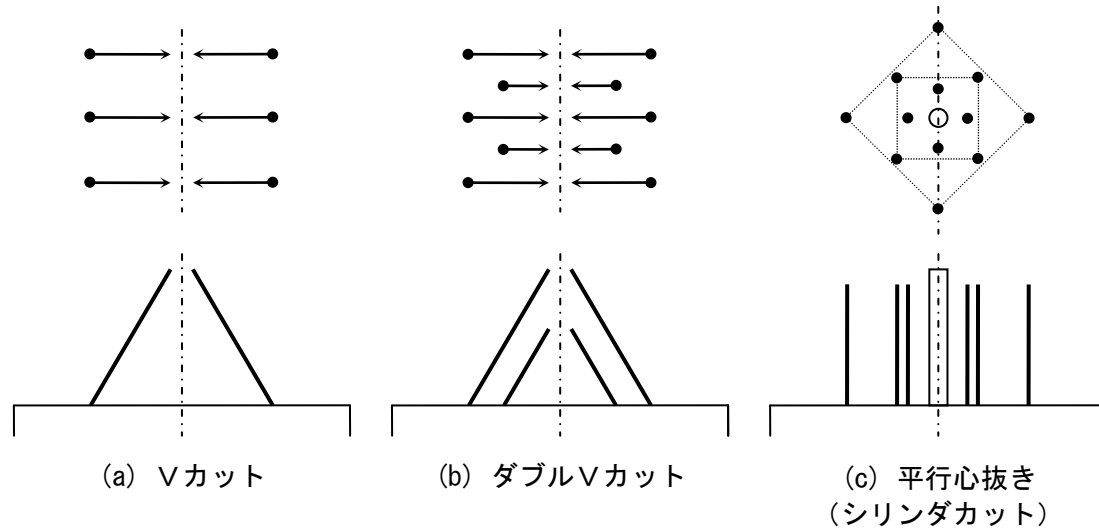


図 2.5 心抜きパターンの例

(3) 機械工法の併用（自由面発破工法）

発破振動の規制値が厳しく，上記の(1)斉発薬量低減および(2) K 値低減では規制値のクリアが困難な場合，自由面発破が採用されるケースがある．自由面発破は，掘削面の中央部や外周部に，TBMや連続孔等の何らかの手段で自由面を設けることで発破振動を低減する方法である．自由面発破に期待する効果としては，心抜き発破が払いになるという C_1 の効果，心抜きの負荷が軽減される C_2 の効果とこれに伴う斉発薬量の低減の効果である．後述するように，既往の自由面発破を実施した実績では，装薬量および K 値が低減された結果として発破振動が低減されたと確認されている．したがって，自由面発破は，前述した(1)斉発約量低減と(2) K 値低減の両面を併せ持っていることから，(1)と(2)とは分けた位置付けとして考えている．

その特徴，現状および課題について次節で記述する．

2.3 自由面発破の特徴




自由発破については、これまでのところ、他の発破振動低減手法も含めて体系的に整理された文献も見受けられない。これまでの施工事例をふまえて、自由面発破の特徴を示すとおおむね以下のとおりである。

- ・ 自由面によって発破の負荷を軽減できるとともに、通常の発破と比較して爆薬量を低減することができる。
- ・ 一般的な多段発破と比較して騒音および振動を低減することができる。
- ・ 掘削面の外周に自由面を設ける場合、これより外周の地山に対する損傷を抑制することができる。
- ・ 割岩工法と比較して、掘削の効率化が可能であり、掘削コストの低減も可能である。
- ・ 施工条件に応じて自由面の規模やパターンを変更することが可能であり、対策としての自由度が高い。

なお、自由面発破は騒音および振動の低減に効果があると考えられるが、これまでの施工事例ではおもに振動低減対策として活用されてきており、騒音の低減効果に触れた事例は少ない。したがって本論文においても、自由面発破の効果としておもに振動低減効果について述べる。

通常発破、自由面発破および割岩工法の比較を表 2.4 に示す。

表 2.4 掘削方式の比較

	通常発破	自由面発破	割岩工法
概要			
	爆薬を用いて掘削する方法であり、硬岩、中硬岩を対象とした場合、効率性・経済性に優れる。	掘削面に部分的な自由面を形成し、これと制御発破を併用することで発破振動を低減する工法である。	トンネル内外周にドリルジヤンボを用いて連続孔を形成して自由面とした後、油圧クサビで一次破碎し、大型ブレーカで二次破碎を行なう工法である。
得失	<ul style="list-style-type: none"> ・硬岩、中硬岩地山において標準的な掘削方式である。 ・周辺環境に与える影響が大きいため、騒音や振動低減対策が必要になることが多い。 ・火薬類取締法にもとづき、火薬類の消費許可が必要である。また、民家が近接する場合には、近隣住民からの承諾が必要となる。 ・重要な制約物件が近接する場合、発破掘削の適用が困難なる場合がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・振動は発破掘削と機械掘削の中間程度である。 ・部分的に自由面を形成する場合、工程および経済性への影響は小さい。 ・火薬類取締法にもとづき、火薬類の消費許可が必要である。また、民家が近接する場合には、近隣住民からの承諾が必要となる。 ・現状では、経験的に自由面のパターンを設計しており、発破振動の事前推定やパターンの最適化が困難である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・硬岩地山であっても無発破掘削が可能である。 ・振動はほとんど発生しない（機械掘削程度）。 ・無発破であるため、飛石が発生せず安全である。 ・通常のトンネル施工機械の他に、油圧クサビや大型ブレーカなどの特殊機械が必要となる。
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ・硬岩、中硬岩地山において最も経済的である。 ・制御発破を行なう場合、削孔数の増加や電子雷管等の使用によって掘削単価が高くなる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・自由面の規模によって掘削単価が変動する。 ・心抜き自由面のように自由面の規模が小さい場合、経済性への影響は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・自由面（スロット）の形成に多大な時間とコストを要するため、経済性への影響が大きい。
工程	<ul style="list-style-type: none"> ・制御発破を行なう場合、削孔数が増加するため若干サイクルタイムが延びるが、工程への影響は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・自由面の形成に伴ってサイクルタイムが延びるため、自由面の規模によって工程への影響が変動する。 ・心抜き自由面のように自由面の規模が小さい場合、工程への影響は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・上記と同様に、工程への影響が大きい。 ・通常の二車線道路トンネルでの掘削速度は1m/日程度。

2.4 自由面発破の施工事例

自由面発破を用いた施工事例を表 2.5 に示す。これは既往の論文や専門誌等で公表された内容を整理したものである。ここでは、たとえば大型ブレーカを用いて掘削面の中央部を局所的に掘削し、これを自由面として利用しているなどの簡易な自由面発破の事例は除き、スロットの形成等、ある程度システマティックに行なった自由面発破を対象とした。必ずしもすべての事例を調査できているとは限らないが、自由面発破は現状では特殊な事例であり通常は何らかの形で対外発表されること、割岩工法の自由面形成技術を用いた場合は工法協会により施工実績が公表されることから、国内の事例についてはある程度の把握は可能である。また、海外においては、ボアホールを自由面として利用するケースは見受けられるが、割岩工法自体が日本国内で発達した工法であり、ここで対象としているようなスロットを活用した自由面発破の事例は見受けられない。したがって、ほとんどの事例を網羅していると考えられる。

表 2.5(1) 自由面発破の施工事例 (1/2)

No.	工 事 名	対 象 地 山		制約物件	離隔(m)	振動 規制値	自由面 形成方法	自由面の位置	備 考
		地 質	地山強度(qu)						
1	中央自動車道	硬質花崗岩	150MPa	—	—	—	SD	外周＋中央	13), 試験施工
2	砕石跡地	硬質花崗岩	240MPa	—	—	—	SD	外周のみ	14), 試験施工
3	本四連係線	黒雲母花崗岩	160～200MPa	既設道路Tn 民家	80m	0.05～0.1kine	SD	外周のみ／中央のみ	15), 16), 17), 18)
4	—	花崗閃緑岩	30～50MPa	既設作業坑	—	—	SD	外周	19)
5	本州四国連絡道路	花崗岩	100MPa	民家	65m	55dB	SD TBM	外周のみ／中央のみ ／外周＋中央	20), 21), 22)
6	山陽自動車道	花崗岩	100～150MPa	家畜 工場	54m 48m	0.1kine 0.5kine	割岩	中央のみ	23)
7	リニア実験線	安山岩	100～150MPa	不安定岩塊	20m	0.03kine	SD	外周のみ	24)
8	奥多々良木発電所	流紋岩	200～250MPa	空洞周辺岩盤	—	—	SD	外周のみ	25), 26), 27)
9	国道179号	粘板岩, 砂岩, チャート	—	導水路Tn	30m	0.2kine	SD	外周のみ／ 外周＋中央	28)
10	神戸山手線	花崗岩	100～200MPa	民家	126m	0.03kine	SD	外周のみ	29)
11	国道312号	凝灰角礫岩	60MPa	民家 導水路Tn	52m 17m	0.05kine 1kine	TBM	中央のみ	30), 31)
12	国道429号	花崗岩	22～127MPa	民家 転石	20m 60m	0.2kine 2.0kine	DPS	外周のみ	32)
13	洲本バイパス	砂岩優勢岩	100MPa	民家 岩盤斜面	27m 20m	65dB 1.7kine	DPS	中央のみ	33)
14	記載なし	—	—	—	—	—	SD	外周＋中央	34), 試験施工
15	国道185号	花崗岩	150～250MPa	民家	70m	60dB	FON	外周のみ	35), 36)
16	国道475号 東海環状自動車道	チャート, 砂岩, 粘板岩	140MPa	高速道路	6m	2kine	SD	外周＋中央	37)
17	一般県道荻原小川線	花崗岩	100～150MPa	既設管路	15m	1kine	FON	外周のみ	32)

(トンネル名は施工時の名称, 表中の“—”は記載なし)

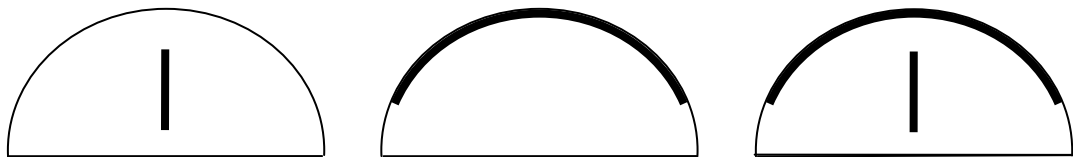
表 2.5(2) 自由面発破の施工事例 (2/2)

No.	工 事 名		対 象 地 山		制約物件	離隔(m)	振動 規制値	自由面 形成方法	自由面の位置	備 考
	路 線 名	トンネル名	地 質	地山強度(qu)						
18	新矢作川用水農業水利事業 細川幹線水路	細川Bトンネル	花崗岩	100MPa以上	民家	15m	60dB	SD	外周／中央	38)
19	国道150号	新日本坂トンネル	玄武岩	70MPa	I期線Tn 民家	10m —	1.5kine —	SD	外周(片側)のみ	39)
20	国道487号	藤ノ脇第1トンネル	花崗岩	100～200MPa	民家	30m	0.19kine	SD	外周のみ	40)
21	東海環状自動車道	鞍ヶ池1号トンネル	花崗岩	—	民家	50m	64dB	—	外周のみ	32)
22	主要地方道 鳥取鹿野倉吉線	三朝トンネル	花崗岩	100～150MPa	旅館	—	—	FON	—	試験施工
23	京阪奈新線	東生駒トンネル	花崗岩	—	ゴルフ場 重要文化財	84m	65dB 0.5kine	SD	外周のみ	41), 試験施工
24	奥津第2発電所	放水路トンネル	粘板岩	30～100MPa	民家	40m	—	SD	外周のみ／中央のみ	42)
25	宇治川床上浸水対策	新宇治川放水路トンネル	チャート	170MPa	周辺地山 (損傷抑制)	—	—	DPS	外周のみ	43)
26	国道56号大洲道路	富士山トンネル	緑色片岩 黒色片岩	100～150MPa	民家	48m	0.1kine	SD	中央のみ	32)
27	国道494号	横山トンネル	黒色片岩 緑色片岩	50～110MPa	不安定岩塊	17m	0.5kine	SD	外周＋中央	44)
28	波介川河口導流事業	波介川用水路トンネル	砂岩, 泥岩	100～150MPa	民家	—	64dB	SD	外周＋中央	45)
29	国道2号三原バイパス	三原第5トンネル	花崗岩	150MPa	JRトンネル	15.5m	1kine	EG-Slitter TBM	外周＋中央	46), 47)
30	国道153号	足助第一トンネル	花崗閃緑岩	100～150MPa	不安定岩塊	4m	3kine	SD	外周のみ／中央のみ	48)
31	主要地方道 松川インター大鹿線	滝沢トンネル	花崗閃緑岩	67MPa	試験発破	—	—	EG-Slitter	中央のみ	49)
32	尾道松江自動車道	横島トンネル	花崗斑岩	100MPa	民家	25m	1kine	FON	中央のみ	50), 51)
33	国道42号紀宝バイパス	紀宝トンネル	花崗斑岩	150～250MPa	民家	47m	0.1kine	SD	外周のみ／ 外周＋中央	52), 53)
34	国道163号清滝生駒道路	清滝トンネル	花崗閃緑岩	100MPa	民家	59m	48dB	EG-Slitter	中央のみ	54), 55)

(トンネル名は施工時の名称, 表中の“—”は記載なし)

既往の施工事例を調べると、自由面の形成パターンは様々であるが、掘削面のどの位置に自由面を形成するのか、という観点で下記の3パターンに大別することができる（図2.6）。

- ・掘削面の中央部に自由面を設ける方法
- ・掘削面の外周部に自由面を設ける方法
- ・中央部と外周部の自由面を組み合わせる方法



(a) 掘削面中央部の自由面 (b) 掘削面外周部の自由面 (c) 中央部と外周部の組合せ

図 2.6 代表的な自由面形成パターン

これらのパターンの使い分けについては必ずしも明確ではないが、調査した資料をもとに、上記の3パターンについて代表的な施工事例を紹介するとともに、特徴や効果について整理する。

(1) 掘削面の中央部に自由面を設ける場合

通常の発破掘削では、心抜き部分で負荷が掛かるため、多くの爆薬量が必要であるとともに、発破係数 K 値が大きくなる。このため、心抜きに伴う発破振動が最も大きくなる。したがって、この心抜きに伴う発破振動の低減に着目して、掘削面の中央部に自由面を設けるパターンである。自由面を心抜き部に限定することで、掘削サイクルに対する負担を小さくすることができる。ただし、振動低減効果は心抜きに限定され、払いは通常の発破と同じであるため、振動の規制がそれほど厳しくなく、自由面の形成を最小限に抑えて効率的かつ経済的な掘削を狙う場合に採用されるものと考えられる。

中央部に自由面を設ける場合、鉛直で形成されるパターンが大半であるが、水平に形成されるパターンやその他にも色々な形状のパターンが見受けられる。ただし、その使い分けは必ずしも明確ではない。

本四連係線トンネル^{15),16),17),18)}では、初めて自由面発破が本格的に採用され、外周スロットの他に心抜き部の鉛直スロットも採用されている（図 2.7）。当該トンネルは小断面であるが、このときの心抜き発破は、通常の制御発破と比較して心抜きの薬量は 4/5 程度に、最大振動速度は 1/3 程度に低減されたと報告されている。

細川Bトンネル³⁸⁾では、硬質岩盤の出現により機械掘削の継続が困難となったことから、自由面発破を採用しており、様々なスロット形成パターンが実施されている。その中の一つとして、心抜き部に水平スロットを設けるパターンが実施されている（図 2.8）。

二車線道路トンネルの滝沢トンネル⁴⁹⁾では、心抜き部に鉛直スロットを設けた全断面掘削を実施しており（図 2.9）、この効果、通常発破と比較して振動速度は約半分に低減されたと報告されている。

横畠トンネル^{50),51)}では、トンネル直上に民家が点在しており、心抜きに伴う振動を低減するため、心抜き部に鉛直スロットを設けている（図 2.10）。この結果、通常制御発破と比較して心抜き薬量は約 50%低減され、心抜き K 値は約 50%低減され、その結果として発破振動が低減されたと報告されている。自由面の形成によって心抜き発破の負荷が軽減され、装薬量および K 値が低減されたものと理解される。

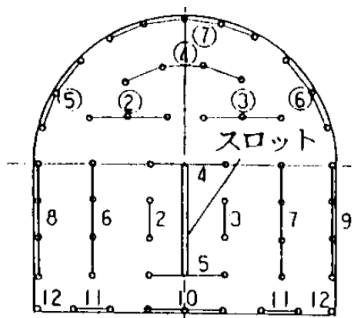


図 2.7 心抜き鉛直スロット(小断面)¹⁵⁾

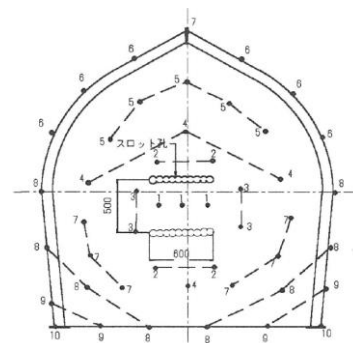


図 2.8 心抜き水平スロット(小断面)³⁸⁾

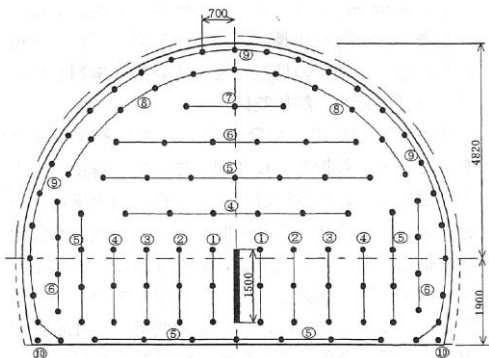


図 2.9 心抜き鉛直スロット(全断面)⁴⁹⁾

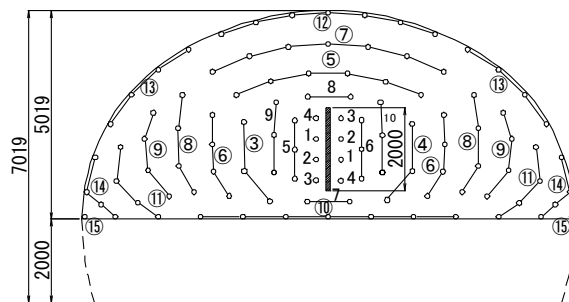


図 2.10 心抜き鉛直スロット(上半)^{50),51)}

他に、心抜き部を矩形の自由面で囲む事例がある。これは、直線の自由面と同様に、心抜きの負荷を軽減すると同時に、振動が外周に伝搬することを遮断する目的で実施されたと考えられる。

宇原トンネル³³⁾では、3パターンの心抜き（図 2.11）が実施され、振動低減効果はバーンホール < 鉛直スロット < 矩形スロットであったと報告されている。また、横畠トンネル^{50),51)}で実施した矩形スロット（図 2.12）は、2回のみ試験的な施工であったが、制御発破（ダブルVカット）と比較して振動速度は 15%程度にまで低減され、鉛直スロットより高い振動低減効果があったと報告されている。

これらの実績より、矩形スロットは鉛直スロットよりも、振動遮断効果の分だけ効果が高いと考えられる。

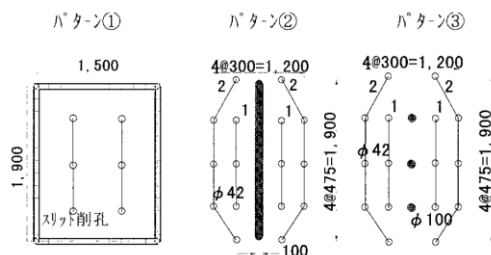


図 2.11 心抜き矩形スロット³³⁾

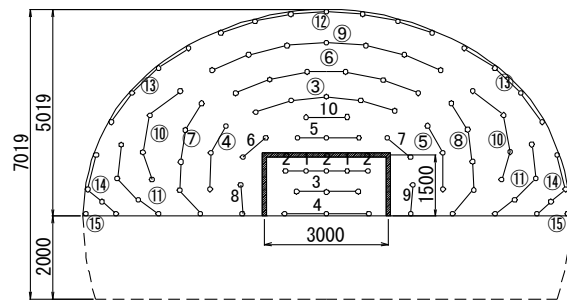
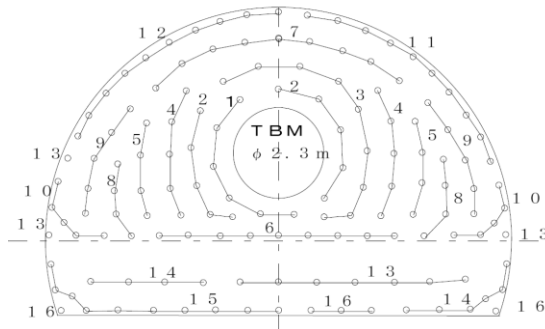
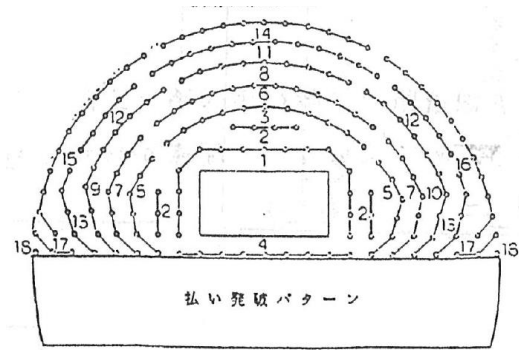


図 2.12 心抜き矩形スロット(上半)^{50), 51)}

特殊な事例としては、舞子トンネル^{20),21),22)}、城山トンネル^{30),31)}では TBM を用いて施工した先進導坑を自由面として利用している（図 2.13）。このときの効果として、TBM 心抜き自由面を用いたときの K 値は、通常的心抜き時の K 値と比較して、舞子トンネルでは約 1/2 に、城山トンネルでは約 1/3 になったと報告されている。また、入野トンネル²³⁾では、心抜き部（約 3m²）を割岩掘削により先行掘削した後、これを自由面として利用し、1 発破進行長を 1/2 として掘削している（図 2.14）。

図 2.13 TBMによる心抜き自由面³¹⁾図 2.14 割岩掘削による心抜き自由面²³⁾

(2) 掘削面の外周部に自由面を設ける場合

振動の規制がより厳しい場合、掘削面の外周部に自由面を形成するパターンが採用されている。期待する効果としては、(1)のパターンと同様に発破の負荷軽減する効果と、掘削面の内側で発生した振動をトンネル周辺地山に伝搬することを遮断あるいは回折によって低減させる効果である。自由面の延長は、中央部のみに設ける場合より大幅に長くなるため、掘削効率やコストよりも、発破振動を低減して規制値をクリアすることが優先される場合に採用されるものと考えられる。

多くの事例では、全断面の外周あるいは上半断面の外周に自由面を形成している。前述の本四連係線トンネルでは、心抜き部鉛直スロットとは別に、外周スロット（図 2.15）を実施して効果を比較している。この結果、通常の制御発破と比較して薬量が 2/5 に、K 値が 1/3 に、最大振動速度は 1/5 に低減されたと報告されている。これは前述した心抜き鉛直スロットの効果より高い。

休山トンネル^{35),36)}では、種々の制御発破（普通発破、切羽の 4 分割発破、外周スロット、電子雷管および外周スロット＋電子雷管）を行い、それぞれ効果を確認している（図 2.16）。その結果、分割発破、外周スロット、電子雷管で同等の振動低減効果が示されているが、外周スロット＋電子雷管が最も振動低減効果が高かったとされている。また、ここでは、騒音の低減効果もあったと報告されている。

外周スロットを心抜きとして利用している事例¹⁹⁾を図 2.17 に示す。このパターンは、既設作業坑下を離隔 1m 未満で交差し、既設調査坑と接する区間で採用されている。ここでは、直上で計測された振動のスペクトルに着目することで、周辺岩盤への影響について検討しており、通常発破と比較して外周スロット発破では高周波成分がより多く伝搬され

ていることから、地山の損傷領域が狭い範囲にとどまっていると推測している。

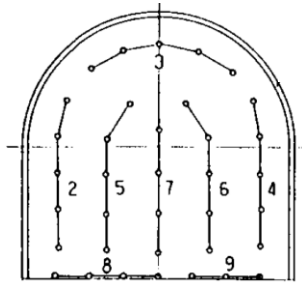


図 2.15 外周スロット(小断面)¹⁵⁾

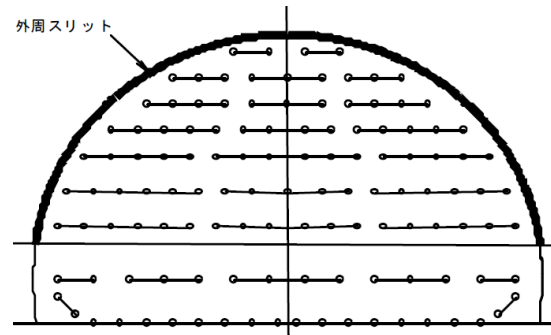


図 2.16 外周スロット(通常断面)³⁶⁾

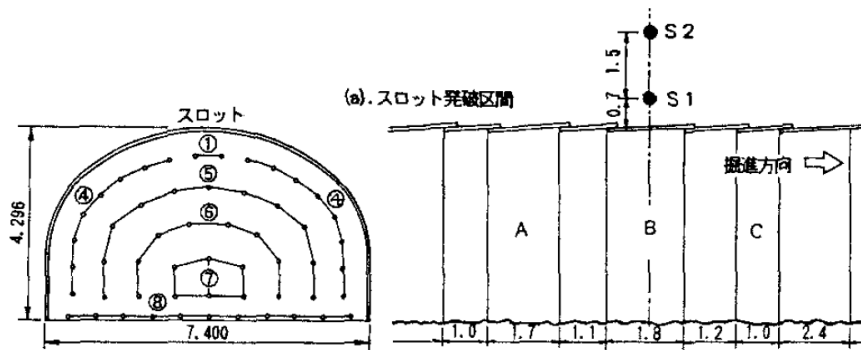
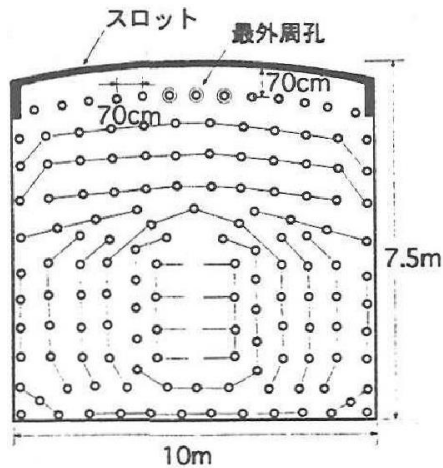
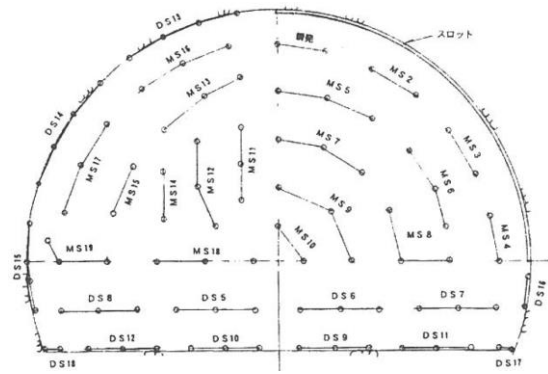


図 2.17 外周スロット¹⁹⁾

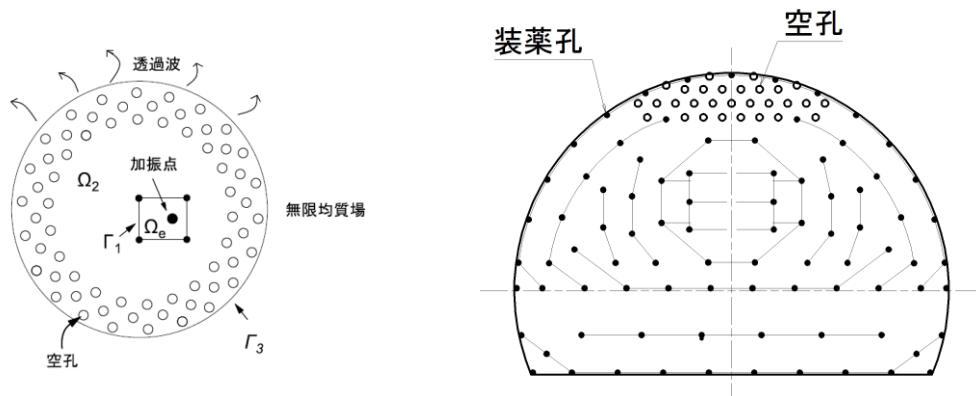
掘削面の外周部に自由面を設ける場合、必然的に自由面の延長が長くなるため、必要個所に限定してスロットを形成することも行われている。

奥多々良木発電所^{25),26),27)}では、天端部直上部の振動低減を図るため、アーチ部のみにスロットを形成している(図 2.18)。この結果、通常発破と比較して振動速度は約 1/10 に、 K 値は約 1/3 に低減されたと報告されている。また、これらの低減効果は、スロットによって発破の破碎効果が高まったことと、スロット端部で振動が回折減衰したことの合成効果であると考察している。

新日本坂トンネル³⁹⁾では、掘進方向に向かって右側側方部に供用中の I 期線トンネルが位置することから、右側の外周部のみにスロットを形成している(図 2.19)。この結果、総装薬量を通常の 70% 程度に抑えけるとともに、振動速度についても厳しい管理基準値をクリアすることができたと報告されている。

図 2.18 アーチ部外周スロット²⁷⁾図 2.19 外周スロット(片側のみ)³⁹⁾

その他、外周部にスロットを設けることによるコスト増大を避けるため、これに代えて空孔列を導入することにより、振動低減を期待する方法も検討されている⁵⁶⁾(図 2.20)。施工精度や現場実証の面で課題は残されているが、数値解析により外部へ透過する波動の低減効果が確認されており、スロットに準じた発破振動低減対策として適用の可能性が示されている。

図 2.20 空孔を配置した振動低減法のイメージ⁵⁶⁾

(3) 中央部と外周部の自由面を組み合わせる場合

中央部と外周部の自由面を組み合わせる場合は、振動の規制がきわめて厳しい場合に採用されているようである。割岩工法と同程度の自由面を形成している事例も見受けられるが、厳しい規制値のもと、少しでも掘削効率を向上させたい事情が背景にあるものと想像される。

網掛トンネル¹³⁾では、試験施工ではあるが、スロットを用いた自由面発破が試行された初めての事例であり、無発破工法とあわせて実施されている（図 2.21）。通常発破と比べ薬量は 1/2 に、 K 値は 60% に低減されたと報告されている。

苔田 2 号トンネル²⁸⁾では、既設導水路トンネルと近接して交差するため、無発破工法および自由面発破による施工が実施されている。ここでは、導水路に最も近接する区間で中央部と外周部に自由面を設けたパターン（図 2.22）とし、離れた区間で外周スロットのみのパターンが採用されている。この結果、スロット率の増加に伴って K 値が減少し、通常制御発破と比較して K 値は 70~30% に低減されている。また、切羽スロット率（スロット延長を切羽断面積で除した値）を導入し、スロット率 0.9m/m^2 で K 値が一定に収束する傾向があることを示しており、スロットによる K 値低減効果に限界があると考察している。

特殊な事例として、横山トンネル⁴⁴⁾では、坑口付近の不安定岩塊への影響を抑制するために自由面発破を採用している。この事例では、外周スロットの形成による縁切りで切羽崩壊が懸念されるとし、外周スロットはミシン目状の断続的に形成するパターンが採用されている（図 2.23）。結果として、通常発破と比較して振動速度は 1/2~1/10 に低減されたと報告されている。

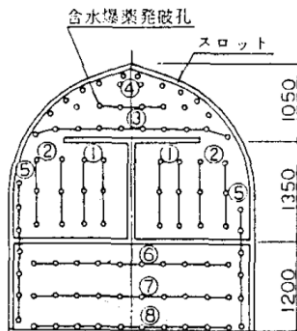


図 2.21 外周+縦横スロット¹³⁾

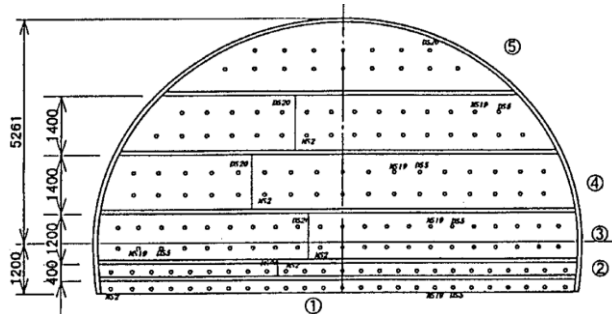


図 2.22 外周+水平スロット²⁸⁾

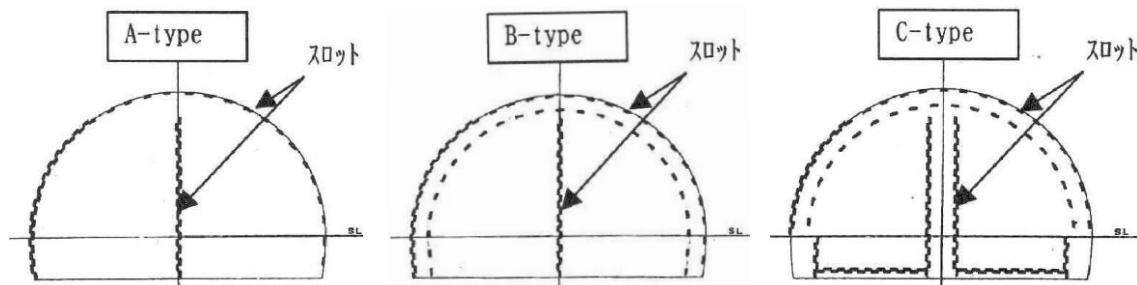


図 2.23 断続的外周スロット+鉛直および水平スロット⁴⁴⁾

舞子トンネルでは、掘削ずり運搬路として利用するため2本の TBM 導坑を施工しており、本坑の拡張時には、地表面の民家に対する振動低減対策として、TBM 導坑を自由面として利用したパターン、TBM 導坑に追加して外周および水平スロットを形成したパターン（図 2.24）、外周スロットのみを形成したパターン、そして通常の制御発破とそれぞれ実施している。この結果、通常の制御発破と比較して K 値は、TBM のみの場合で約 50%に、TBM+外周スロットの場合で約 30%に、外周スロットのみの場合で約 70%に低減されたと報告されている。

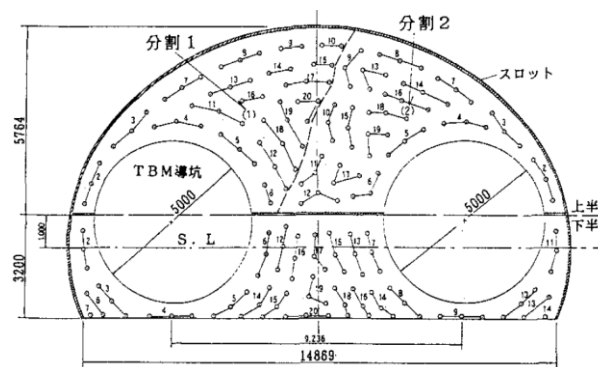


図 2.24 TBM+外周+水平スロット²¹⁾

2.5 横畠トンネルでの施工事例^{50), 51)}

尾道松江自動車道 横畠トンネルは、広島県北部に位置する2車線道路トンネルである(図2.25)。最小土被り25mの民家直下区間に対して発破振動の低減が必要となったことから、心抜き自由面発破を採用したところ、非常に良好な振動低減効果が確認された。ここでは、横畠トンネルで実施した心抜き自由面発破の施工を通じて得られた振動低減効果等の施工実績について整理する。

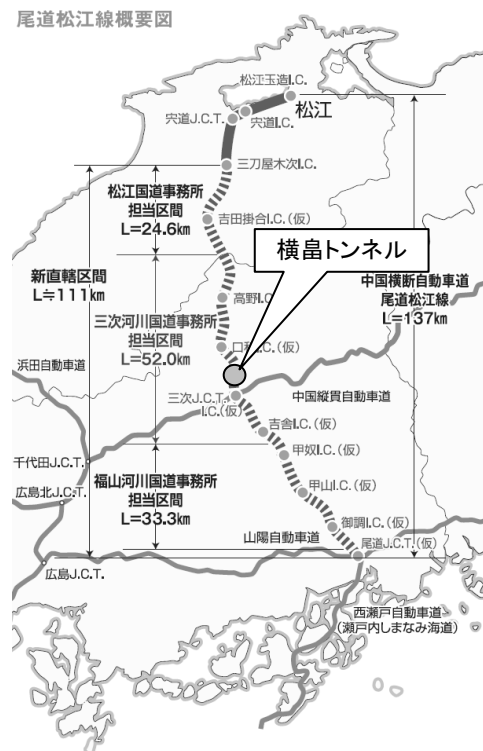


図 2.25 位置図

(1) 横畠トンネルの概要

1) 地形・地質概要

民家直下区間の地質縦断図を図2.26に示す。当該区間の地質は、中生代白亜紀の花崗斑岩を主体としている。花崗斑岩は小岩体および帯状または岩脈状に分布している。長石や石英の斑晶を有する斑状組織を呈する花崗岩類で、当該地の基盤岩を構成している。

弾性波速度は、坑口部を除き 2.7～4.2km/s、一軸圧縮強度 q_u =約 100MPa、地山等級は主にCⅡ～CⅠである。

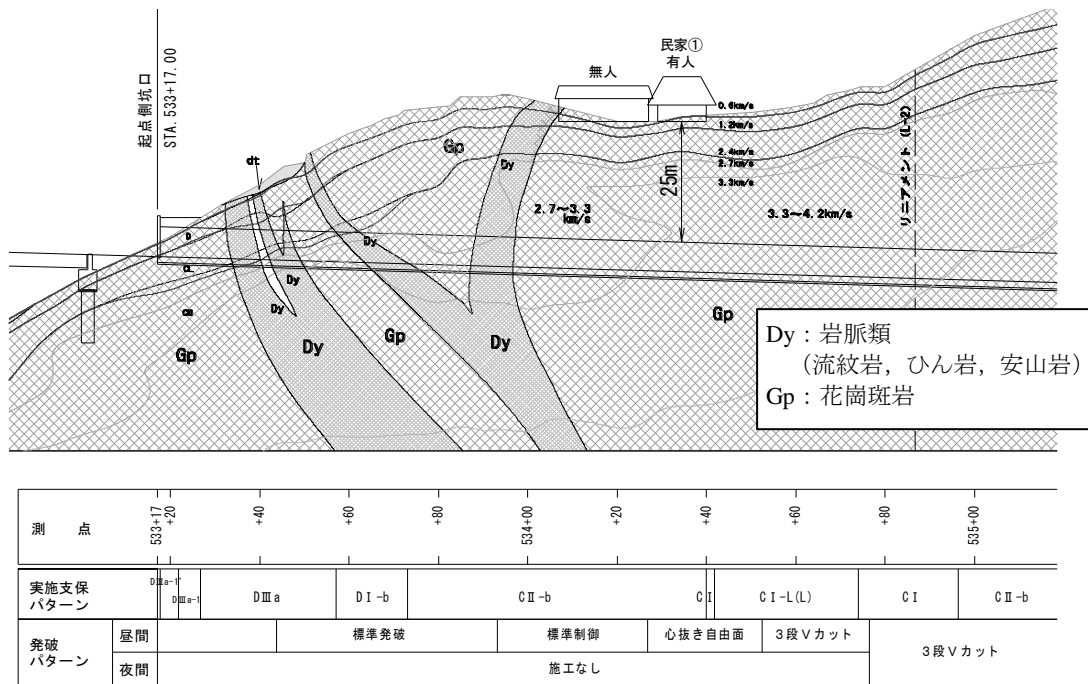


図 2.26 制御発破区間の地質縦断

2) 施工上の特徴

民家との再接近位置における横断面を図 2.27 に示す。起点側坑口部より約 100m 地点の地表面に民家が点在しており、ここを最小土被り 25m で発破掘削する計画であった。しかしながら、振動の管理目標値（振動レベル 75dB，振動速度 0.4kine）をクリアできないことから、何らかの振動低減対策が必要とされた。

対象地質が中硬岩～硬岩の花崗斑岩であったことから、機械掘削の適用は困難であり、割岩工法は経済性の点で採用が困難であった。このため、民家直下区間で心抜き自由面発破を採用した。

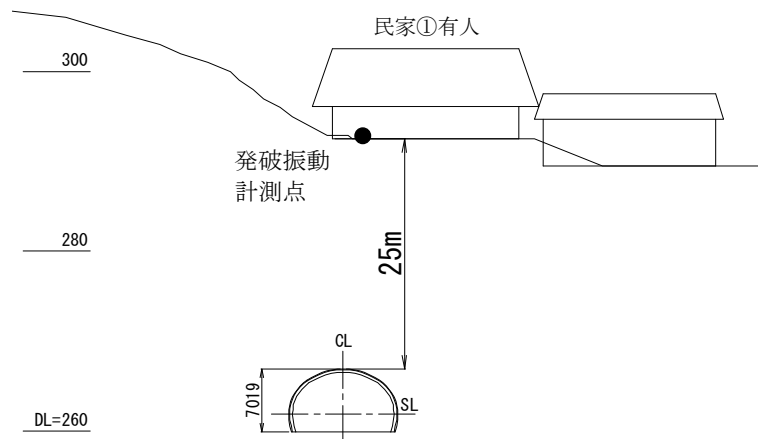


図 2.27 民家との最接近断面

(2) 振動低減対策

事前に実施した発破振動の検討結果より、民家直下区間における発破振動の低減対策は、昼間のみの施工、上下半の分割掘削および DS+MS 雷管による多段発破を標準制御発破として実施する計画とした。

民家に到達する直前から急速に振動速度が増加する傾向を示したため、さらなる振動低減対策が必要となった。このため、心抜き対策として心抜き自由面あるいは3段Vカットを追加して実施した。実施した振動低減対策を表 2.6 に、実施した主な発破パターンを図 2.28～2.30 に、自由面の形成状況を写真 2.5 に示す。

表 2.6 近接区間で実施した振動低減対策

a)	標準制御発破	DS+MS 雷管（最大 23 段）（図 2.27）
b)	ボアホール追加	a) + 心抜き周辺に $\phi 100$ のボアホール 10～50 孔
c)	心抜き自由面発破 1	a) + 心抜きに直線の自由面（民家直下で採用）（図 2.28, 写真 2.5）
d)	心抜き自由面発破 2	a) + 心抜き周辺に矩形の自由面（試験施工）（図 2.29, 写真 2.6）
e)	3 段 V カット	a) + 3 段 V カット（民家通過後）

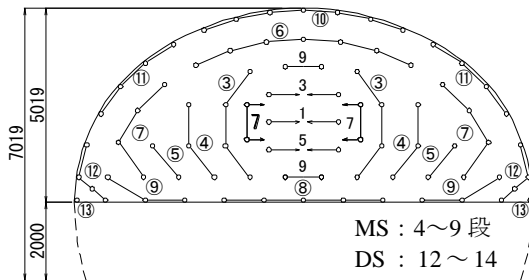


図 2.28 標準制御（C II-b 上半）

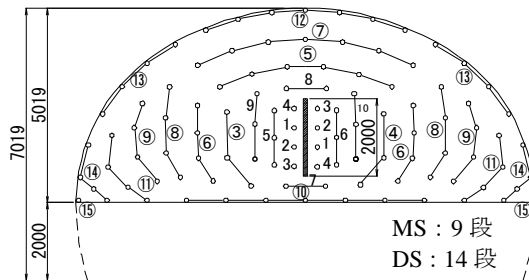


図 2.29 心抜き自由面 1（C II-b 上半）

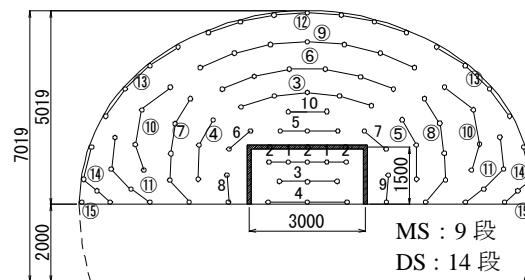


図 2.30 心抜き自由面 2（C II-b 上半）



写真 2.5 心抜き自由面 1



写真 2.6 心抜き自由面 2

(3) 施工結果

1) 装薬量

各発破パターンで使用した爆薬量の実績を表 2.7 に示す。同じ支保パターンで比較すると、心抜き自由面 1 では心抜き部が 2 自由面発破となり、心抜きの負担を大きく低減できるため、心抜き薬量は標準制御発破の 50%程度に減少している。ただし、この効果は心抜き近傍にとどまり、払い孔の薬量減少はわずかであるため、総薬量の減少は 10%程度である。心抜き自由面 1 と 3 段 V カットでは総薬量に大きな差はなかった。

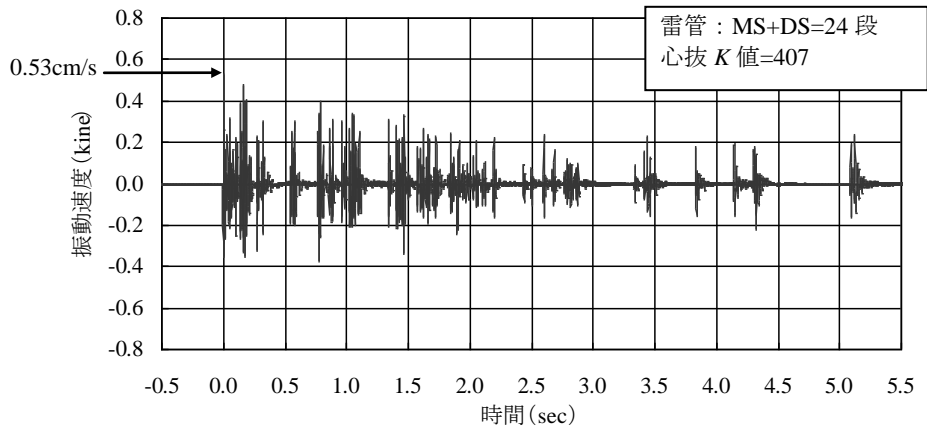
表 2.7 使用薬量の実績（上半掘削）

区分	発破パターン	心抜き薬量	平均総薬量	標本数
C II-b	標準制御	1.5 kg	43.4 kg	11
	ボアホール	1.1 kg	45.6 kg	8
	心抜き自由面 1	0.6 kg	39.5 kg	6
	心抜き自由面 2	1.2 kg	41.6 kg	2
C I-L	心抜き自由面 1	0.7 kg	69.1 kg	6
	3 段 V カット	0.5 kg	69.1 kg	10

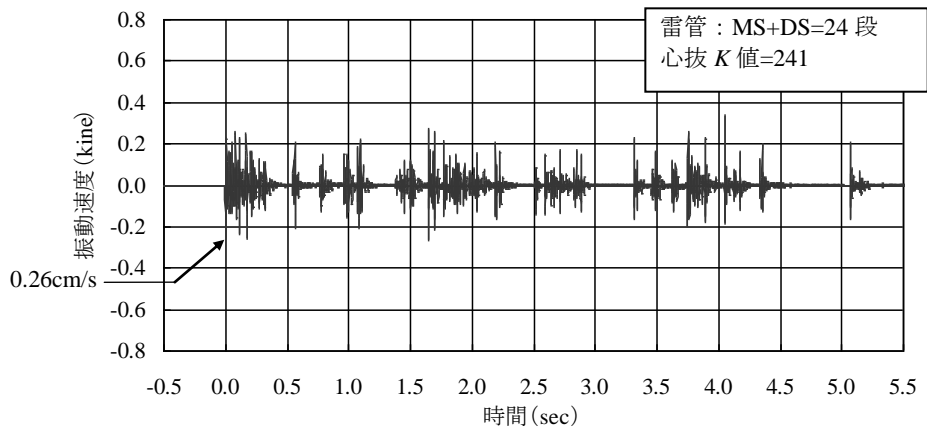
2) 振動速度

標準制御および心抜き自由面 1 について、振動速度の波形データを図 2.31 に示す。通常の振動速度波形は心抜きでピークを示すが、心抜き自由面 1 では心抜きに伴う振動を

低減したことによって、心抜きと払いの振動が同等程度になっており、おおむねバランスが取れていたと言える。ただし、心抜きと払いが逆転するケースも発生している。これ以上の振動低減が必要な場合、払いの低減対策も併せて検討する必要がある。



(a) 標準制御



(b) 心抜き自由面 1

図 2.31 代表的な振動速度波形

振動計測点から切羽までの離隔 D と心抜きに伴う振動速度 V の関係を図 2.32 に示す。ここでは、制御発破の効果を検証するため、下半やインバート掘削等の発破データは除外するとともに、心抜きの装薬がほとんど必要なかったデータは除外した。また、図中の太線は、制御発破を行う前に実施していた標準発破（坑口部除く）の回帰曲線である。

標準制御発破およびボアホールは、おおむね標準発破の回帰曲線上にあるが、心抜き自由面 1 および 3 段 V カットは回帰曲線より下方にシフトしており、振動速度が低減さ

れていることを示している。

離隔 D が同程度の民家直下付近で振動速度を比較すると、心抜き自由面 1 の振動速度は、標準制御発破のおおよそ 30% 程度に低減されており、心抜き自由面 2 の振動速度は、標準制御発破の 15% 程度にまで低減されている。

装薬量の違いを考慮して振動速度の値を評価するため、換算距離 SD_s と心抜きに伴う振動速度 V の関係を図 2.33 に示す。 SD_s は、離隔 D を心抜き装薬量 W_s の立方根で無次元化したもの ($D/W_s^{1/3}$) としている⁵⁷⁾。標準制御、ボアホールおよび 3 段 V カットは、おおむね標準発破の回帰曲線上にあるが、心抜き自由面 1 および 2 は回帰曲線より下方にシフトしている。装薬量の低減効果を控除したとしても、自由面の形成により振動速度が低減されていることを示している。

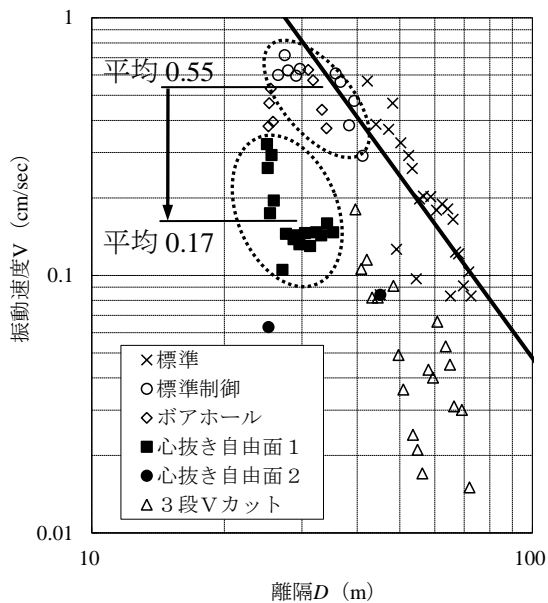


図 2.32 距離と振動速度の関係

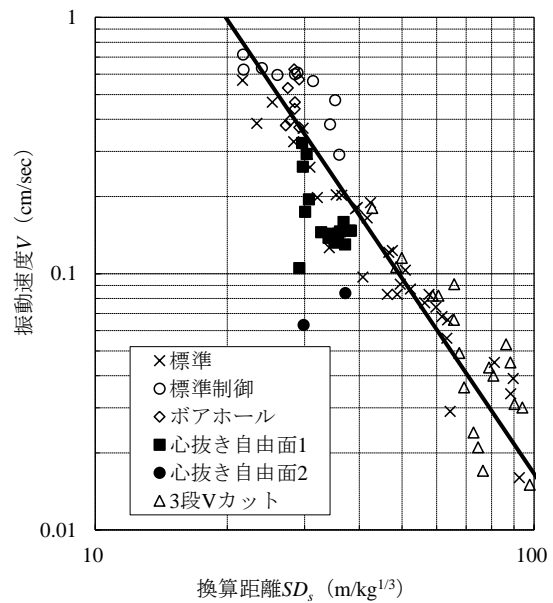


図 2.33 換算距離と振動速度の関係

3) K 値

比較的條件に近い計測点前後における、坑口からの距離 TD と K 値の関係を図 2.34 に、このときの K 値の平均値および標準偏差を表 2.8 に示す。標準制御発破とボアホールとの差は小さい。また、両者ともに変動が大きい。

一方、心抜き自由面 1 では、 K 値は標準制御発破と比較して 50% 以下と大きく低減されている。また、実施当初は変動も見られたが、装薬パターンの微修正により変動を小

さくすることができている。心抜き自由面2の K 値は、標準制御発破の20%程度にまで低減されている。

3段Vカットでは、 K 値が小さくなることもあるが、変動が大きく平均値も高い。これは、補助心抜きの効果を高めるためには精度の高い削孔技術が必要であるが、作業員の技量に依存するだけでは十分な削孔精度が得られないためと考えられる。

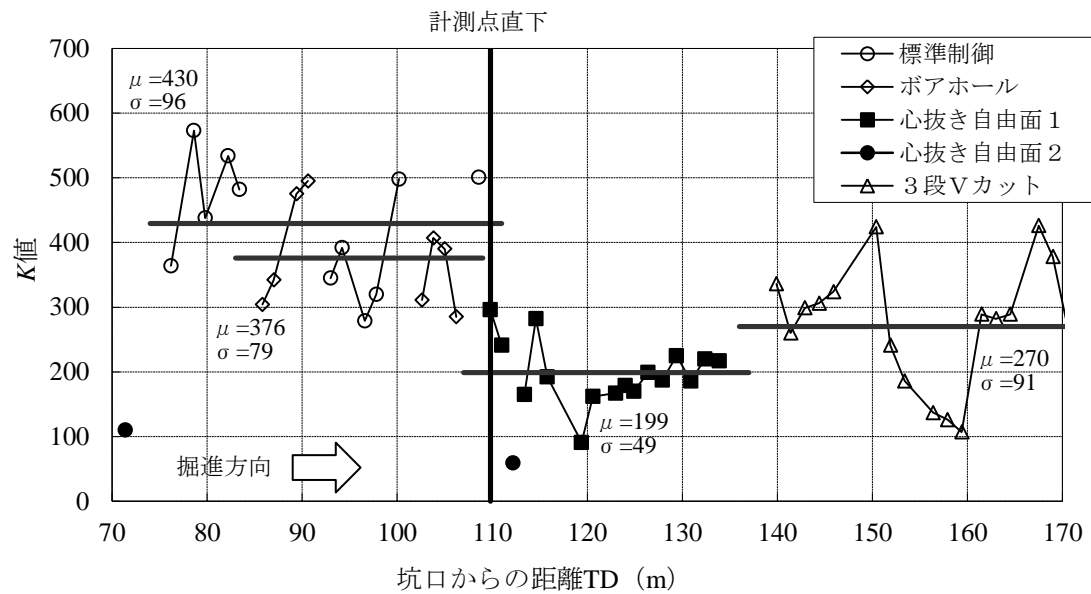


図 2.34 計測点前後の K 値

表 2.8 発破パターン毎の K 値（心抜き）

発破パターン	平均 μ	標準偏差 σ	備考
標準制御	430	96	MS+DS
ボアホール	376	79	10～50 孔
心抜き自由面 1	199	49	
心抜き自由面 2	85	—	
3 段 V カット	270	91	

2.6 自由面形成パターンの採用傾向

前節まで、自由面の形成パターンとして様々なパターンが実施されていることを示した。しかしながら、様々実施されている自由面形成パターンの採用過程は不明である。そこで、各パターンの採用過程を推測するため、どのような条件の場合にどのような自由面が採用されているのか、その採用傾向を整理する。

振動を低減しようとする場合、対象物までの離隔と管理基準値が問題であり、自由面形成パターンの採用過程に影響を与えと考えられる。そこで、この2つのパラメータが明記されている事例だけを対象として、どのような条件の場合にどのようなパターンが採用されているのか整理した結果を図 2.35(a)に示す。ここで、複数の自由面パターンを採用している事例については、それぞれのパターンごとにカウントした。また、振動レベル(dB)で管理している事例については、振動速度(kine)に換算して整理した。

いずれのパターンのプロットも幅広く分布しており、ここから何らかの傾向を読み取ることにはできない。文献では、通常は離隔の最小値が記載されており、複数パターンを採用している場合、離隔に応じてパターンを使い分けている可能性もある。ただし、単一パターンを採用した事例のみを対象とした整理結果においても、その傾向はあまり変わらない(図 2.35(b))。これまでの自由面形成パターンの採用過程において、あまり合理性が存在していないことの表れと考えられる。

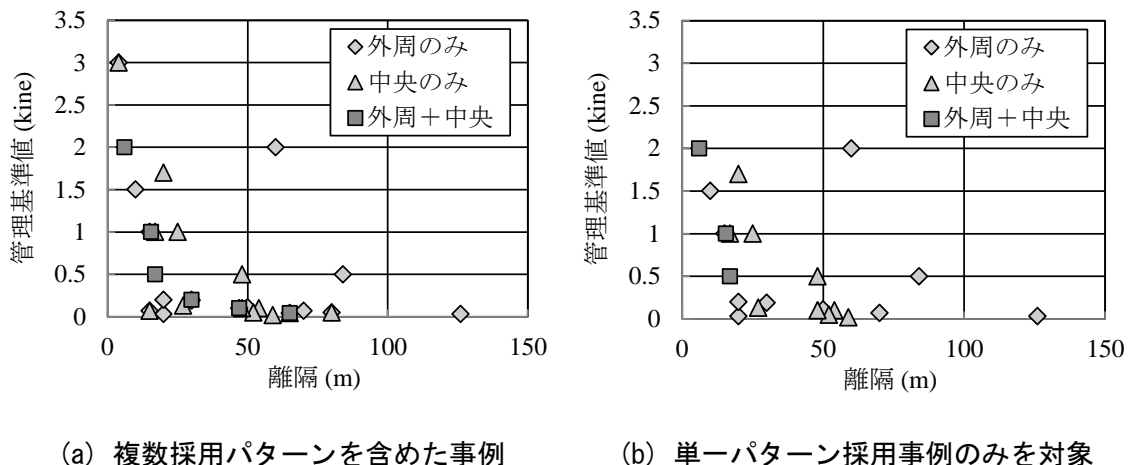


図 2.35 自由面形成パターンごとの離隔と管理基準値

2.7 第2章のまとめ（自由面発破の課題）

本章では，自由面発破の既往事例を整理し，自由面の形成パターンとして様々なパターンが実施されており，いずれの事例においても高い振動低減効果が確認されていることを示した．また，発破振動の計測実績より，自由面の効果の序列はおおむね，

$$\text{心抜き部スロット} < \text{外周スロット} < \text{外周+心抜き部スロット}$$

と考えられることを示した．しかしながら，いずれの事例においても，自由面形成パターンの採用過程は明確ではなく，あまり合理性も見受けられないことが明らかになった．

自由面の形成には多大なコストと時間を要するため，最小規模の自由面で最大限の振動低減効果を得ることが施工上の課題となるが，既往の事例を整理するだけでは，掘削面のどの部分にどのような形状の自由面を形成すれば良いのかを決定することができない．

しかも，スロットの長さ，位置，形状を変更すれば，無限の自由面形成パターンを考えることができる．たとえば，心抜き部に自由面を形成する場合を例にとれば，図 2.36 に示すような様々なパターンを考案することができる．それぞれ効果は異なると考えられるが，どのようなパターンを採用すべきか一意に決定することができない．

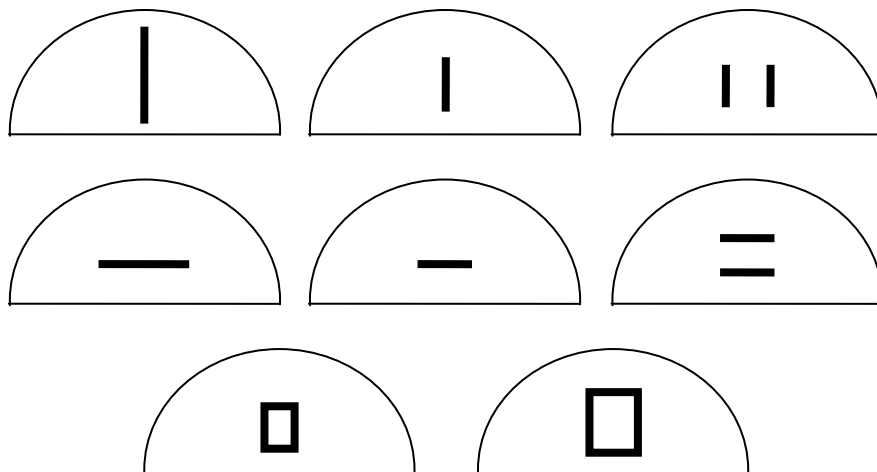


図 2.36 心抜き部の自由面形成パターン案

現状では，様々なパターンのなかから，施工条件に応じて最適なパターンを事前に選定

しようとした場合、従来の経験式では自由面の効果を K 値あるいは装薬量の低減で表現するほかないが、これらがどのような値をとり得るのかを事前に知ることができない。そもそも現状では、最適な自由面のパターンを経験的に設計できるほど施工実績の蓄積はないため、経験式による最適な自由面形成パターンの検討は困難である。また、事前に多数の自由面形成パターンについて試験施工を行なうことも現実的ではない。このため、自由面発破パターンの合理的な設計手法の確立が望まれる。

自由面発破パターンの合理的な設計手法が確立されていない背景としては、自由面の併用による振動低減のメカニズムが十分に解明されておらず、このため振動低減効果の定性的かつ定量的な議論が十分になされていないためと考えられる。しかしながら、発破による岩盤の動的破壊や振動伝搬の挙動は、高速かつ複雑な現象であり、実施工あるいは実験的にこれら計測しようとする、多大な労力が必要であり、しかも計測できるデータには限度がある。したがって、これらを解決するためには、発破による破壊と振動とを適切に評価できる数値解析手法の適用が有効と考えられる。

第2章の参考文献

- 1) 土木学会：トンネル用語辞典 2013 年版，2013.
- 2) 社団法人 火薬学会 発破専門部会：現場技術者のための発破工学ハンドブック，共立出版，p.300，2001.
- 3) ジェオフロンテ研究会：現場技術者のための制御発破工法の実例—発破による騒音や振動を制御する技術資料—，p.116，1996.
- 4) 日本火薬工業会：あんな発破こんな発破 発破事例集，pp.10-13，2002.
- 5) 山田隆昭 監修：わかりやすいトンネルの発破技術，土木工学社，pp.52-56，2008.
- 6) 一般財団法人 建設物価調査会：平成 26 年度 国土交通省土木工事標準積算基準書（河川・道路編）.
- 7) 文献 2) の p.95.
- 8) 株式会社ジャペックス：技術資料.
- 9) カヤク・ジャパン株式会社：EDD（電子遅延式電気雷管）カタログ.
- 10) 雑喉謙：発破振動の周辺への影響と対策，鹿島出版会，pp.14-23，1984.
- 11) 河野興，吉永正雄，小松正三，中川浩二：小口径バーンカットの破碎機構に関する実験的検討，トンネルと地下，Vol.36，No.8，pp.51-59，2005.
- 12) 三谷健：発破騒音、振動を軽減するトンネル掘削の研究-2-，建設の機械化，No.459，pp.56-64，1988.
- 13) 本田裕夫，村上進，萩森健治：硬岩の無発破トンネル掘削工法の開発，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.39，III-245，pp.489-490，1984.
- 14) 萩森健治，村上進，本田裕夫：低公害岩盤掘削工法の実用化，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.40，III-124，pp.247-248，1985.
- 15) 萩森健治，竹知芳男，中川浩二，古川浩平：トンネル外周スロットによる発破振動の低減，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.42，III-258，pp.540-541，1987.
- 16) 萩森健治，竹知芳男，古川浩平，中川浩二：スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究，土木学会論文集，No.391/VI-8，pp.142-150，1988.
- 17) 萩森健治，竹知芳男，藤井哲夫，古川浩平，中川浩二：硬岩トンネルのスロット発破工法に関する研究，岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，Vol.20，pp.111-115，1988.
- 18) 竹知芳男：スロットを利用した低振動発破工法，日本トンネル技術協会第 20 回施工体験発表会，pp.66-71，1988.
- 19) 新田宏基，寺田道直，萩森健治，島本哲郎：トンネル発破掘削におけるスロット効果について，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.47，III-329，pp.698-699，1992.
- 20) 牧野卓三，大塚勝司：大口径 TBM 工法と SD 工法による舞子トンネルの施工，日本トンネル技術協会

- 第 30 回施工体験発表会, pp.25-30, 1992.
- 21) 浜田元, 三島功裕, 牧野卓三, 新田宏基: TBM 導坑を自由面とする制御発破工法の振動低減効果, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.48, VI-180, pp.380-381, 1993.
 - 22) 萩森健治, 浜田元, 水原憲三, 牧野卓三, 高島紀彦: スロット削孔機と蒸気圧破碎薬を利用した超低振動破碎工法の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.50, VI-98, pp.196-197, 1995.
 - 23) 門脇邦義, 奥隅豊栄, 鳥元直己: 入野トンネルの振動低減工法について, 第 20 回日本道路会議論文集一般論文, pp.296-297, 1993.
 - 24) 安波盛雄, 高田章, 末延敏: 発破併用 S D 工法を用いた振動対策, リニア実験線・初狩トンネル, トンネルと地下, Vol.24, No.9, pp.7-15, 1993.
 - 25) 手塚昌信, 大西有三, 三木茂, 中川浩二: スリットを併用した発破工法による発破振動の低減に関する基礎的研究, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.28, pp.154-158, 1997.
 - 26) 蓮井昭則, 三木茂, 手塚昌信, 瀬岡正彦, 中川浩二, スロットを併用した発破工法の発破振動について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.52, III-B149, pp.298-299, 1997.
 - 27) 手塚昌信, 三木茂, 中川浩二: スロット(縁切り)工法による爆源近くの発破振動低減に関する検討, 土木学会論文集 No.588/VI-38, pp.165-178, 1998.
 - 28) 綾木修, 倉橋信夫, 前田元三: スロット工法による既設導水路トンネルに近接した道路トンネルの掘削, 土木学会中国支部 研究発表会発表概要集, pp.621-622, 1997.
 - 29) 岡本伸一: 都市トンネルにおける振動および地表沈下対策, 日本トンネル技術協会第 42 回施工体験発表会, pp.31-40, 1998.
 - 30) 多々納浩二, 岡村光政, 内藤將史: TBM 導坑と電子遅延式雷管を活用した発破振動抑制, 日本トンネル技術協会第 42 回施工体験発表会, pp.1-10, 1998.
 - 31) 大窪正秋, 岩崎日出夫, 岡村光政, 多々納浩二: 電子遅延式雷管を用いた制御発破における振動抑制効果, トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol.8, pp.157-162, 1998.
 - 32) ジェオフロンテ研究会: 割岩工法便覧, 割岩工法に関する技術資料(総集編)巻末資料 施工事例集, 2006.
 - 33) 木戸一善, 岸本安弘, 岡村光政, 清原啓太: 各種パターンによる発破振動制御について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.54, III-B59, pp.118-119, 1999.
 - 34) 須田博幸, 古賀成樹, 塚本耕治, 栗田猛志: スロットと I C 雷管を併用する低振動発破工法の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.55, VI-69, pp.138-139, 2000.
 - 35) 山田周一, 石川庄嗣, 土屋敏郎: 制約条件の厳しい呉の市街地トンネルー国道 185 号道路改良休山ト

- ンネル西一，トンネルと地下，Vol.31，No.5，pp.7-13，2000.
- 36) 野間達也，土屋敏郎：外周スリットと電子雷管を用いた制御発破の試験施工，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.55，VI-67，pp.134-135，2000.
 - 37) 稲葉靖興，若山博，桐木俊之，佐藤常雄：中央自動車道直下における東海環状自動車道の立体交差施工，日本トンネル技術協会第46回施工体験発表会(山岳)，pp.41-50，2000.
 - 38) 山本正，河上力，萩森健治：低公害掘削工法による小断面トンネルの施工，日本トンネル技術協会第48回施工体験発表会(山岳)，pp.31-40，2001.
 - 39) 松本章，岩本至：新日本坂トンネルにおける低振動発破工法について，第24回日本道路会議一般論文集(B)，pp.156-157，2001.
 - 40) 山本雅昭，松岡秀之，須田博幸，塚本耕治：スロットとEDDを併用した低振動掘削工法，火薬学会2002年度年会，pp.5-6，2002.
 - 41) 龍川展行，竹知芳男：環境に配慮した都市部での山岳トンネル施工，日本トンネル技術協会第52回施工体験発表会(山岳)，pp.73-80，2003.
 - 42) 榎原豊博，山本康治，藤原已紀夫：奥津第二発電所新設工事における環境保全対策，電力土木，No.303，pp.25-29，2003.
 - 43) 森安弘，中谷幸一，草信元春，森本精郎，岡林福好：水圧1.1MPaに耐えるウォータータイトトンネルー新宇治川放水路トンネルー，日本トンネル技術協会第55回施工体験発表会(山岳)，pp.57-64，2004.
 - 44) 喜田雅紀，森良弘，萩森健治，西村修平：不安定岩塊に近接するトンネルの低振動発破掘削，トンネル工学報告集，Vol.15，pp.129-134，2005.
 - 45) S D工法協会技術委員会：S D工法施工報告書，2005.
 - 46) 梅田一成，島津嘉裕，立道智生，木村幸雄：JR新幹線直上部での高速低振動トンネル施工，西松建設技報，Vol.2，pp.89-90，2006.
 - 47) 黒川英知，梅田一成，島津嘉裕，木村幸雄：TBM先進導坑および新割岩工法で新幹線直上部を掘るー国道2号三原バイパス第5トンネルー，トンネルと地下，Vol.38，No.1，pp.33-38，2007.
 - 48) 佐藤昌彦，大野和民，山本正，橘高豊明：転石群に近接するトンネルの低振動掘削，トンネル工学報告集 Vol.17，pp.113-120，2007.
 - 49) 石山宏二，木村哲，岡村光政，内藤将史，金子勝比古，福田大祐：自由面発破工法の提案，資源・素材2008(仙台)講演集，No.1，A21-12，pp.65-68，2008.
 - 50) 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，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.66，VI-387，pp.773-774，2011.

- 51) 若月和人, 木村能隆, 多田芳葉, 高橋渉: 心抜き自由面発破による発破振動の低減効果, トンネル工学報告集, Vol.21, pp.225-232, 2011.
- 52) 柴田匡善, 星野直則, 浜田元, 蛭子清二, 安井成豊: スロットと電子雷管遅延式電気雷管を組合せた制御発破工法による振動の低減, トンネル工学報告集, Vol.21, pp.215-223, 2011.
- 53) 浜田元, 星野直則, 柴田匡善, 蛭子清二: SD・EDD 発破工法を用いた硬岩トンネルの低振動掘削, 日本トンネル技術協会第70回施工体験発表会(山岳), pp.10-18, 2012.
- 54) 内見和彦, 細井匡之: トンネル直上家屋への影響を考慮した発破掘削, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68, VI-399, pp.797-798, 2013.
- 55) 才田遼子: 近隣集落の生活環境に配慮したトンネルの発破掘削について, 近畿地方整備局研究発表会論文集, 施工・安全管理対策部門, No.19, 2013.
- 56) 齋藤優, 若月和人, 阿部和久, 紅露一寛: 空孔導入によるトンネル発破振動低減効果の解析的検討, 計算数理工学論文集, Vol.14, pp.1-6, 2014.
- 57) 社団法人 日本騒音制御工学会技術部会 低周波音分科会編: 発破による音と振動, 山海堂, pp.52-53, 1996.

第3章

発破に関する数値解析手法の現状と課題

3.1 発破と数値解析

コンピュータが発達する以前では、発破による岩盤の破壊理論の中心は、経験則や実験および理論にもとづく展開であった。これらの代表的なアプローチとして、Hauserの公式¹⁾、村田の引張主応力破壊理論²⁾、日野の衝撃波破壊理論³⁾などが挙げられる。また、Langefors⁴⁾、Gustafsson⁵⁾、Olofsson⁶⁾らによって実用的な式や図表が示されている。これらは、効率的な発破を行なうための装薬量や発破パターンを検討することに対して大きな役割を果たした。

その後、コンピュータの発達とともに、発破の分野においても様々な数値解析が行なわれるようになり、たとえば、一自由面発破における応力解析、スームブラスティングにおける応力解析や亀裂進展解析、ベンチ発破における破碎岩の挙動や飛石解析等、幅広い分野で適用されてきた。

近年では、コンピュータ性能の目覚ましい向上により、3次元解析や複雑な解析モデルが使用されるようになってきている。しかしながら、現状においても発破に関する数値解析の中心は応力解析や破壊挙動のリアルなシミュレーションであり、発破振動に着目した研究はわずかである。この要因としては、振動解析を行う際、対象となる地山条件を完全に明らかにすることは通常は困難であり、ある程度の不確かさを許容したなかで式(1.1)のような経験式と実測データのフィードバックで対応するやり方が、実務上の都合が良いためと考えられる。

一方、自由面発破による振動低減機構は、定性的かつ定量的な議論は現状では必ずしも十分ではない。かつて、スームブラスティングの理解に数値解析が大きく寄与したことが同様に、自由面発破による振動低減機構の理解とさらなる普及のために、数値解析手法の適用は欠かせないと考えられる。

ここでは、自由面発破を用いた振動低減工法に数値解析を適用する際の課題や留意点について整理するため、発破に関する数値解析の現状について述べる。

3.2 発破問題に関する数値解析の現状

数値解析手法には、下表に示すとおり様々な手法が存在しており、それぞれの特徴を考慮しながら発破に関する解析にも適用されている。

表 3.1 おもな解析手法の比較⁷⁾

解析手法	目的	主変数	従属変数	要素の特性	不連続性の表現
有限要素法 (FEM)	連続体解析	節点変位	要素ひずみ, 応力	弾性体, 弾塑性体など	ジョイント要素など
有限差分法 (FDM)	連続体解析	節点変位増分	要素ひずみ, 応力	弾性体, 弾塑性体など	インターフェイス要素など
個別要素法 (DEM)	不連続体解析	ブロックの剛体変位増分, 剛体の回転増分, 節点変位増分	ブロック間の接触力	剛体, 弾性体, 弾塑性体など	バネ-ダッシュポット-スライダー
不連続変形法 (DDA)	不連続体解析	要素の剛体変位, 剛体回転, ひずみ	要素応力	弾性体	バネ (ペナルティ法, モール・クーロンの摩擦特性)

なお、上表に記載はないが、境界要素法 (BEM) についても、適用事例は少ないながら発破解析に適用されたケースは存在する。

以下、発破に関する数値解析の現状を示す。ここでは、発破の破壊挙動を考慮し、(1)連続体解析と(2)不連続体解析の2つに大別して述べる。

(1) 連続体解析

発破の数値解析が行なわれるようになった初期の頃は、有限差分法が多用されている。差分法は、これを陽解放で解く場合は連立方程式を解く必要がなく、コンピュータに対する負荷が小さいため、当時のコンピュータ能力であっても動的応力解析を行うことができたためと考えられる。

佐々ら⁸⁾は、爆源近傍の応力状態や破壊挙動および媒体内に投射される波動について調べるため、有限差分法を用いた動的応力解析を行っている。これにより、発破孔近傍では圧縮あるいはせん断破壊し、発破孔から少し離れた位置で放射状の引張亀裂が発生するということなどの知見を得ている。

この手法を用いて、勝山ら⁹⁾は、媒体内に存在する空孔によって発破時の動的応力状態がどのように擾乱されるか検討している。波長 λ と空孔直径 d の比率 λ/d について、これ

が2～3より大きい場合は伝搬方向に圧縮，垂直方向に引張の応力集中を示して静的な解に近くなり，小さい場合は空孔壁面で波動が反射し引張となることを示している。

また，一自由面発破における応力状態の検討では，発破孔周辺と自由面近傍で引張応力が大きくなるが，自由面で応力が解放されるため，最小抵抗線から離れると引張応力は小さくなり引張破壊が生じにくくなること，そして，発破当初は自由面側に亀裂が卓越し，後半は水平方向と最小抵抗線と逆方向に亀裂が成長するという亀裂進展挙動と，クレータ状の破壊形状をおおよそ再現している（図3.1(a)）¹⁰⁾。

さらに，複数孔を設けた解析によって，スムーズブラスティングにおける破壊機構や動的応力状態について検討し，発破孔間隔が最小抵抗線の1.6倍より大きくなるとスムーズブラスティングの効果が現れないことを示している（図3.1(b)）¹¹⁾。

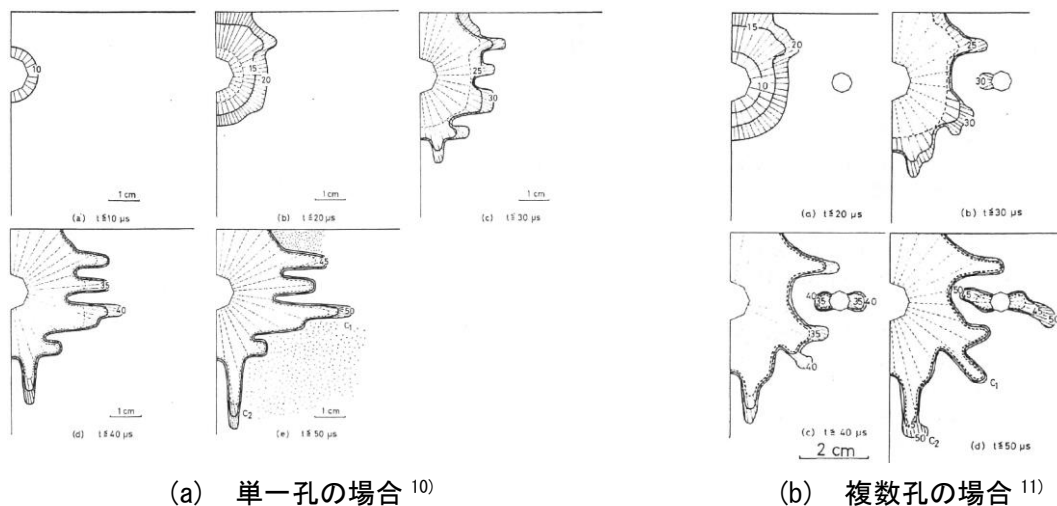


図 3.1 亀裂の成長過程のシミュレーション

一方，有限要素法では，材料の非線形性や不均一性，複雑な境界条件の取扱いが容易であるため，発破問題への適用事例も多く，より実用的な解析が行なわれている。

久武¹²⁾は，発破問題では地質特性，現場の幾何学条件および発破条件を考慮する必要があることから，有限要素法を用いた動的応力解析と振動解析を行うとともに，既設トンネルとの近接発破を行なった現場での実測データとの対比により，解析手法の妥当性を確認している。この結果，既設トンネル覆工における最大引張応力の発生位置は，発破点と既設トンネルとの距離によって変化すること，最大振動速度と最大引張応力との関係は，両対数上で直線的な相関関係があることなどを確認している。

金子ら¹³⁾は、有限要素法を用いて発破に伴う亀裂進展解析を行っている。この解析手法では、引張破壊に伴う亀裂は要素境界のみに発生すると仮定し、亀裂の発生・伸長・連結などの幾何学的取扱いは、破壊と判定された場合に新節点を追加して要素境界辺を分離することで対応している。これにより、無自由面発破では、発破の初期段階では孔壁の全周に亀裂が発生するが、時間の経過に伴って、ほぼ等間隔の方向性を持つ何本かの亀裂のみが卓越して伸長する、という亀裂の成長プロセスを明らかにしている。

また、自由面に平行な3つの発破孔を有するスムースプラスティングを想定した解析で、斉発または比較的起爆秒時誤差が小さい場合、互いの発破孔からの応力波によって孔間領域で引張応力が高まるとともに、その上下に圧縮ゾーンが形成され、孔間を結ぶ破断面が形成されて、地山側の損傷が抑制される、というメカニズムを明らかにしている¹⁴⁾。

笹岡ら¹⁵⁾は、有限要素法を用いて、石灰石鉱山において残壁の保護を目的として行われるプレスプリットにおける振動低減効果について検討している。プレスプリットを施工した際の残壁周辺岩盤における発破振動の伝搬挙動を明らかにするとともに、プレスプリットの深度や位置をパラメータとして解析を行い、適切なプレスプリットの施工が可能であるとしている。

事例は少ないものの、発破問題への境界要素法の適用事例も見られる。平田ら¹⁶⁾は、発破に伴う既設トンネルの動特性を明らかにするため、既設トンネル覆工壁面の振動を計測するとともに、境界要素法を用いた数値解析結果との対比を行っている。計測データより、既設トンネル外周の緩み領域の存在に起因して、既設トンネルの振動が岩盤中のそれより振動時間が長く、最大振幅値が大きいこと、そして、特定の周波数成分が増幅されていることを確認している。さらに、境界要素法を用いて「岩盤+緩み領域+既設トンネル」の領域に対して行った応答解析では、実測結果と良い対応を示すことを確認している。

(2) 不連続体解析

以上で示したとおり、有限差分法、有限要素法および境界要素法は、発破に伴う動的応力状態や振動特性の理解には有効であった。しかしながら、これらの手法は連続体解析であることから、発破孔近傍における発破後のごく初期段階における亀裂進展や応力状態の検討には十分と考えるが、自由面発破における K 値低減の効果（式(2.1)の C_1 や C_2 ）を表現することは困難と考える。したがって、自由面発破における振動低減効果を表現するためには、連続体から離散体に至る一連の破碎過程を適切に表現する解析手法の存在が不可欠

と考える。

発破の破壊挙動に不連続体解析を適用した既往の研究では、個別要素法 (Distinct Element Method : DEM)^{17),18)} や不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis : DDA)¹⁹⁾ を用いた各種解析が行われている。

目黒ら²⁰⁾は、発破解体工法によるビル破壊のシミュレーションを行なうため、個別要素法を適用した数値解析を実施しており、連続体解析では適用困難な破壊挙動をリアルに再現できることを示している。ただし、当時はまだ個別要素法の研究が始まったばかりであり、コンピュータ能力が現在ほど高くなかったためと考えられるが、大雑把な破壊挙動を再現するにとどまっており、実務レベルの解析には至っていない。

Preeceら²¹⁾およびFirthら²²⁾は、鉱山の採掘作業で行なわれる典型的なベンチ発破において、採掘された鉱石の品位を確保するためには、発破時の鉱石の動きを正確に知ることが重要であることから、個別要素法を用いた数値解析の実用性について検討している。その結果、解析結果は実際の発破結果と良く一致していること、そしてこの解析手法が鉱石の採掘を最適化するために有効であることを示している (図3.2)。

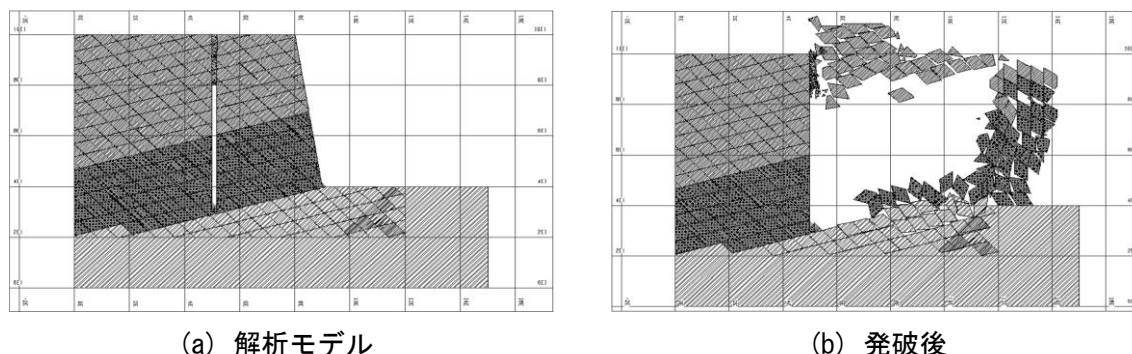


図 3.2 個別要素法によるベンチ発破の解析例²³⁾

Potyondy²³⁾らは、発破による破碎プロセスでは、爆ごうに伴う shock-wave とガス圧が重要な役割を果たすことから、この両者の効果を考慮した岩盤破碎プロセスを議論するため、岩盤を粒状体としてモデル化した個別要素解析を行っている。 shock-wave のみの解析とガス圧を考慮した解析の比較より、ガス圧を考慮することにより破碎域が広がることを示すとともに、手法の適用性を示した。

Cundall の個別要素法とは異なるアプローチとして、Munjiza ら²⁴⁾は、亀裂進展や破碎を取り扱うために有限-個別要素法 (Finite-Discrete Element Method : FDEM) を開発した。この

有限-個別要素法は、有限要素法と個別要素法とを組み合わせたものであり、有限要素内の主応力が引張強度に達すると、主応力方向と直交する面で有限要素を分割し、分割面には個別要素と同じ接触モデルを設定するものである（あるいは、分割する代わりに、もっとも近い要素辺に接触モデルを設定する）。また、この解析手法を発破解析に適用している²⁵⁾。

さらに、Minchintonら²⁶⁾は、発破による破壊は応力とガスによって引き起こされることから、個別要素解析と要素間に作用するガスを考慮する流動体解析を組み合わせた有限-個別要素解析を行っている。いくつかの解析結果を例示して、自由面付近において波動の反射に伴って生じる引張応力によって亀裂が発生すること、十分な込物を実施した場合は亀裂へのガス侵入の効果によってより良く破碎することなどを示している（図3.3）。

ただし、有限-個別要素法はCPUに強い負荷を掛けるため、大規模な解析を行なうことが困難であり、高性能コンピュータの使用が不可欠である²⁷⁾。

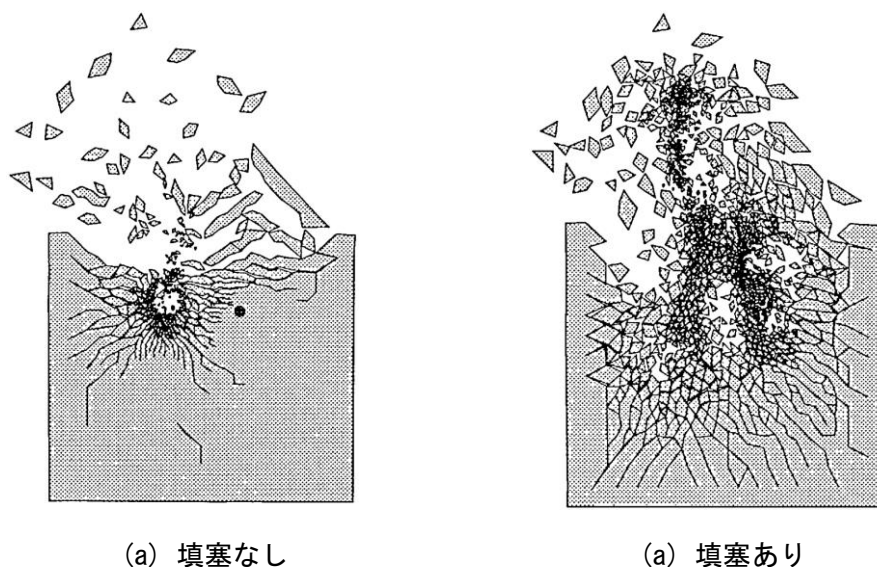


図 3.3 有限-個別要素法によるベンチ発破の解析例²⁶⁾

破壊挙動だけでなく発破後の応力状態に着目した研究事例として、吉川ら²⁸⁾は、発破に伴う応力解放挙動を明らかにしている。豊浦砂を固結させた供試体を用いた発破実験と個別要素法を用いた数値解析とを実施し、実験結果で発生した水平方向に破壊された挙動と解析結果はほぼ同じであったこと、そして解析結果より得られた供試体内の応力分布からは、発破後に供試体内に引張応力が残存することを確認している。

以上は、個別要素法を用いた破壊挙動の解析であるが、Chenら²⁹⁾は、亀裂を有する岩盤

を対象として個別要素法を用いた振動解析を実施している。地下発破の実験で得られた振動速度と解析結果とを比較し、遠くない領域であれば両者は良く一致していることを示している。ただし、発破孔から離れた岩盤における応答振動のみに着目しており、自由面のない地下発破であるため岩盤の破碎挙動は研究の対象外であったようである。

一方の不連続変形法については、以下のようなものである。勝山ら³⁰⁾および馬ら³¹⁾は、一自由面発破やスムーズブラステイングを対象として、不連続変形法を用いた解析を行っており、発破実験や既往の解析結果との対比により、発破孔周辺の亀裂成長過程をある程度シミュレートできることを示している。

緒方ら³²⁾は、ベンチ発破で発生する飛石について検討するため、碎石場における発破実験と不連続変形法を用いた解析を行っており、飛石の飛翔速度は実験結果と解析結果とで同程度であったこと、自由面付近で発生する飛石が最も高速度で飛翔することを明らかにしている。不連続変形法は、発破による破壊現象を含んだ飛石のシミュレーションにも適用できることを示している。

ただし、これらの不連続変形法を用いた初期の研究事例は、比較的大雑把なシミュレーションであり、おおまかな破壊挙動を定性的に確認するのみであった。近年では、より実用的な解析が行なわれるようになっている。たとえば、Mortazaviら³³⁾は、ベンチ発破において地層勾配の違いが破壊挙動に与える影響について検討している（図3.4）。

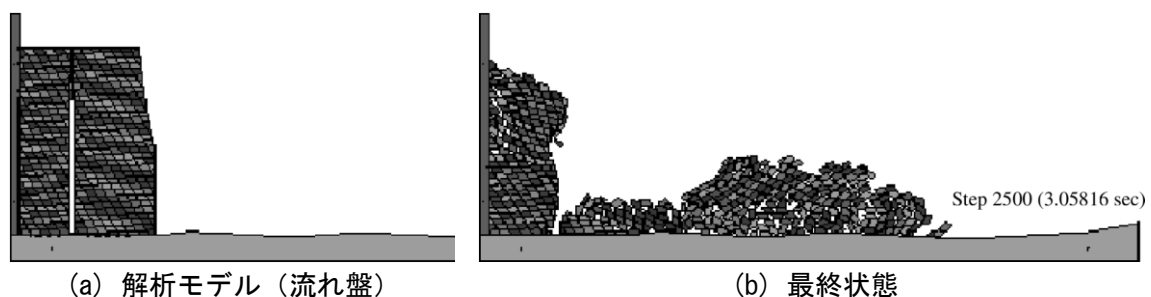


図 3.4 不連続変形法を用いたベンチ発破の解析例³³⁾

しかしながら、不連続変形法では、動的な岩盤力学問題に対して、応力波の伝搬特性、非反射の境界条件およびジョイント強度の低減等が十分に考慮されていない、といった問題も指摘されている³⁴⁾。

3.3 ガス圧の取扱い

数値解析を行なう場合、多くのパラメータを設定する必要があり、正しい解析結果を得るためには、これらを適切に設定することがきわめて重要である。とくに、発破の解析を行なう場合、ガス圧は重要なパラメータの一つであるにもかかわらず、その取扱いは不明確である。

既往の研究事例では、圧力波形を三角波³⁵⁾、台形波^{36), 37)}、あるいは次式のような指数関数³⁸⁾で近似する方法が広く用いられている（図 3.5）。

$$P(t) = P_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \quad (3.1)$$

また、岩盤内でのガスを状態方程式と流動体解析で表現した事例³⁹⁾もある。しかしながら、ガス圧は発破の数値解析において重要な入力値であるものの、その取扱いには不明確な部分が残っている。

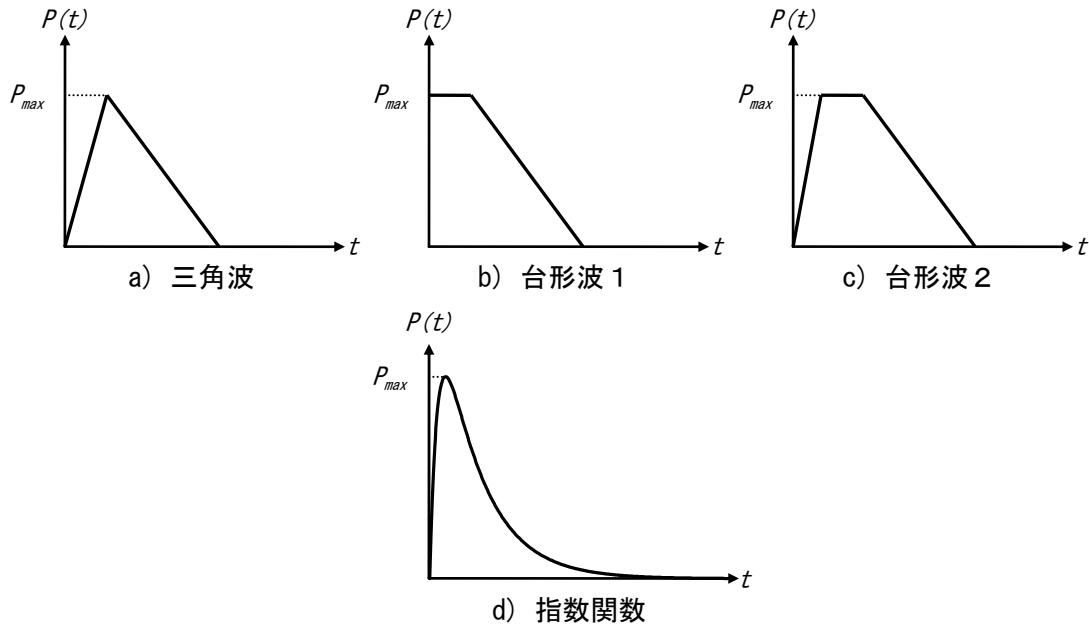


図 3.5 圧力波形の例

ガスの圧力波形を特徴づけるパラメータとして、ガスの最大圧力およびガス圧が最大値に達するまでの時間（以下、立ち上がり時間と呼ぶ）が挙げられる。

ガスの最大圧力については、発破解析で使用実績の多い JWL 状態方程式⁴⁰⁾を適用する方法が考えられるが、トンネルの発破掘削で多用されている含水爆薬に対する適用性は不明であり、検証された事例も見当たらない。

また、立ち上がり時間については、これに依存して応力状態や破壊形態が異なることが知られている^{41),42)}。しかしながら、既往の研究における立ち上がり時間は、おおよそ1～20 μs の範囲で設定されている^{31),37),38),43)}ものの、その設定根拠は明確でない。あるいは、解析の不安定化を抑制する目的で設定されている³⁷⁾。

このように、ガス圧の取り扱いが明確でないことの要因としては、ガス圧の発生は、瞬間的にきわめて大きな圧力が作用する反応であるため、これを直接的に実測することは通常は困難であり、実際の発破作業で計測や検証が行われていないためと考えられる。

3.4 第3章のまとめ（数値解析手法における課題）

以上に示したとおり, 既往の発破問題に対する数値解析の適用事例は数多く存在するが, 連続体解析では, 発破後のごく初期段階における解析であり, 岩盤破壊の影響を考慮することができない. 不連続体解析では, これまではおもに発破に伴う亀裂の進展や破碎された岩の動きや飛翔といったおおまかな破壊挙動の把握が主目的であった. 振動に着目した研究事例もわずかに見受けられるが, 逆に破壊挙動が不明であった.

このように, これまでの発破問題に関する数値解析では, 発破後の動的破壊とそれに伴う振動の両者を取り扱った事例は見あたらない. また, 発破解析の結果に大きな影響を与えるガス圧の取扱いについても不明確であった.

このため, 発破振動の低減を目的とした自由面発破の検討のためには, 動的破壊とそれに伴って発生する振動とを適切に評価できる数値解析手法を確立する必要があると考えられる. また, この数値解析手法の妥当性確認と信頼性の確保に資するため, 自由面発破における破壊と振動の実挙動およびガス圧の作用特性を把握する必要があると考えられる.

第3章の参考文献

- 1) 社団法人 工業火薬協会：新・発破ハンドブック，山海堂，pp.18-20，1989.
- 2) 村田勉，田中一三：岩石発破に関する力学的研究，工業火薬学会誌，Vol.15，No.4，p.297，1954.
- 3) 日野熊雄：Theory and practice of blasting，
- 4) U. Langefors, and B. Kihlstrom : The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley and Sons, pp.186-200, 1979.
- 5) R. Gustafsson : Swedish Blasting Technique, 1973. (和田満穂 監訳「新しい発破技術」，森北出版，1981.)
- 6) S. O. Olofsson : Applied Explosives Technology, 1990. (最新発破技術ハンドブック編集委員会 訳「最新発破技術ハンドブッケー岩を拓く」，山海堂，1992.)
- 7) 土木学会：山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務 トンネル・ライブラリー第16号，p.132, 2006.2.
- 8) 佐々宏一，伊藤一郎：爆轟衝撃による材料の破壊と波動について，材料，Vol.21，No.221，pp.123-129, 1972.
- 9) 勝山邦久，佐々宏一，伊藤一郎：空孔の存在による動的応力のじょう乱に関する数値解析，材料，Vol.21，No.228，pp.839-845，1972.
- 10) 勝山邦久，佐々宏一，伊藤一郎：一自由面爆破におけるき裂およびクレータの生成機構についての一考察，日本鉱業会誌，Vol.88，No.1014，pp.465-470，1972.
- 11) 勝山邦久，佐々宏一，伊藤一郎：スムーズ・ブラスティングの場合の破壊機構と最適爆破条件の検討，日本鉱業会誌，Vol.89，No.1019，pp.7-12，1973.
- 12) 久武勝保：トンネルの合理的設計・施工に関する基礎的研究，大阪大学学位論文，pp.65-76，1982.
- 13) 金子勝比古，松永幸徳，山本雅昭：発破における岩石破碎過程の破壊力学的解析，火薬学会誌，Vol.56，No.5，pp.207-215，1995.
- 14) 金子勝比古，山本雅昭，諸岡敬太，田中義晴：スムーズブラスティングにおける起爆秒時精度の影響，火薬学会誌，Vol.58，No.3，pp.91-99，1997.
- 15) 笹岡孝司，島田英樹，松井紀久男：発破振動の最終残壁に及ぼす影響を考慮したプレスプリットの最適施工に関する研究，石灰石，Vol.393，pp.22-28，2015.
- 16) 平田篤夫，稲葉力，金子勝比古：発破に起因するトンネルの振動特性，資源と素材，Vol.107，No.7，pp.481-487，1991.
- 17) P. A. Cundall : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Proceedings of the Symposium of ISRM, pp.129-136, 1971.

- 18) 伯野元彦：破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー，森北出版，1997.
- 19) G. H. Shi and R. E. Goodman：Proc.25th U. S. Symposium on Rock Mechanics， pp.269-277， 1984.
- 20) 目黒公郎：コンクリートの破壊解析への個別要素法の適用，コンクリート工学，Vol.31，No.5， pp.5-17， 1993.
- 21) Dale S. Preece， Stephen H. Chung and J. Paul Tidman：An assessment of ore waste and dilution resulting from buffer/choke blasting in Surface Gold Mines， Fragblast - International Journal for Blasting and Fragmentation， Vol.2， pp.195-204， 1998.
- 22) I. R. Firth， and D. L. Taylor：Integration of numerical codes and mine planning software in visualization of 2D bench blasting.doc， Computer Applications in the Minerals Industries， pp.351-354， 2001.
- 23) D. O. Potyondy， P. A. Cundall， and R. S. Sarracino：Modeling of shock-and gas-driven fractures induced by a blast using bonded assemblies of spherical particles， Rock Fragmentation by Blasting， pp.55-62， 1996.
- 24) D.R.J. Owen， A. Munjiza， and N. Bicanic：A finite element-discrete element approach to the simulation of rock blasting problems， Proc. 11th Symp. on Finite Element Methods in South Africa， Centre for Research in Computational and Applied Mechanics， pp.39-58， 1992.
- 25) A. Munjiza， D.R.J. Owen， and N. Bicanic：A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids， Int. J. Engineering Computations， 12， pp.145-174， 1995.
- 26) A. Minchinton and Peter M. Lynch：Fragmentation and heave modelling using a couple discrete element gas flow code， Fragblast - International Journal for Blasting and Fragmentation， Vol.1， pp.41-57， 1997.
- 27) T. Lukas， G. G. Schiava D’Albano， and A. Munjiza：Space decomposition based parallelization solutions for the combined finite-discrete element method in 2D， Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering， Vol.6， pp.607-615， 2014.
- 28) 吉川直孝，伊藤和也，水谷高彰，堀智仁，豊澤康男，三田地利之：着火材を用いた固結粒状材料の発破実験とその個別要素解析，第48回地盤工学研究発表会発表講演集， pp.29-30， 2013.
- 29) S. G. Chen， J. G. Cai， J. Zhao， and Y. X. Zhou：Discrete element modelling of an underground explosion in a jointed rock mass， Geotechnical and Geological Engineering， Vol.18， pp.59-78， 2000.
- 30) 勝山邦久，緒方雄二，和田有司：不連続変形法による一自由面爆破シミュレーションの試み，資源・素材学会研究・業績発表講演会講演要旨集， pp.269-270， 1994.
- 31) 馬 貴臣，三宅淳巳，小川輝繁，和田有司，緒方雄二，勝山邦久：発破シミュレーションと発破解体時の振動軽減，火薬学会誌，Vol.56，No.1， pp.33-43， 1995.
- 32) 緒方雄二，和田有司，勝山邦久，三宅淳巳，小川輝繁，西田佑：ベンチ発破における飛石の飛翔性に

- 関する実験的研究, 火薬学会誌, Vol.59, No.5, pp.254-260, 1998.
- 33) A. Mortazavi1, and P.D. Katsabanis :Modelling the effects of discontinuity orientation, continuity, and dip on the process of burden breakage in bench blasting, Fragblast - International Journal for Blasting and Fragmentation, Vol.4, pp.175-197, 2000.
 - 34) Y. Ning, J. Yang, X. An, and G. Ma : Simulation of blast induced crater in jointed rock mass by discontinuous deformation analysis method, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, Vol.4, No.2, pp.223-232, 2010.
 - 35) 緒方雄二, 田中誠, 手島利之, 古閑豊, 井清武弘 : 起爆法の相違による発破効果の検討, 工業火薬, Vol.48, No.6, pp.355-360, 1987.
 - 36) 伊藤一郎 : 火薬類の爆発による岩盤の破壊, 材料, Vol.23, No.248, pp.332-340, 1974.
 - 37) 金子勝比古, 山本雅昭, 諸岡敬太, 田中義晴 : スムースブラスティングにおける起爆秒時精度の影響, 火薬学会誌, Vol.58, No.3, pp.91-99, 1997.
 - 38) Jung,W-J., Utagawa,M., Ogata,Y., Seto,M., Katsuyama,K., Miyake,A. and Ogawa,Y. : Effects of rock pressure on crack generation during tunnel blasting, 火薬学会誌, Vol.62, No.3, pp.138-146, 2001.
 - 39) A.Munjiza, J.P.Latham and K.R.F Andrews : Detonation gas model for combined finite-discrete element simulation of fracture and fragmentation , International Journal for NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING, 49, pp.1495-1520, 2000.
 - 40) デトネーション研究会 : デトネーションの熱流体力学 1, 基礎編, 理工図書, pp.157-158, 2011.
 - 41) 伊藤一郎, 佐々宏一, 谷本親伯 : 爆破による岩石の破壊機構(主としてガス圧による破壊), 材料, Vol.20, No.209, pp.203-208, 1971.
 - 42) 趙祥鐸, 三宅秀和, 木村哲, 金子勝比古 : 一自由面破碎の破壊プロセスに及ぼす圧力波形の影響に関する数値解析, Science and Technology of Energetic Materials, Vol.64, No.3, pp.116-125, 2003.
 - 43) 福田大祐, 金子勝比古, 石山宏二, 内藤将史 : 大口径ガイドホールを用いたトンネル最外周発破における破断面平滑性に関する数値的検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.1, pp.213-223, 2012.

第4章

自由面発破に対する数値解析手法の構築

4.1 概要

第2章および第3章では、自由面発破をより使いやすいものにするため、自由面発破における振動低減効果の解明と、合理的な設計手法の確立が必要であり、このためには、動的破壊と振動とを適切に評価できる数値解析手法の確立が必要であることを示した。本章では、このための数値解析手法を提案する。

発破に伴う破壊や振動の現象は完全には解明されていないが、発破で生じたエネルギーは発破孔壁で応力波に変換され、これが媒体中を伝搬して破壊域を形成するとともに、破壊に費やされなかった余剰エネルギーの一部が弾性波となって発破振動になると考えられる^{1), 2)}。そこで、発破孔壁に投入されるエネルギーのうち、岩盤の破壊に費やされる破壊エネルギー、破壊された岩塊を飛散させる運動エネルギー、および破壊に費やされず周辺の岩盤に放出される放射波動エネルギーに着目し、効率よく岩盤破碎を行なうとともに、放射波動エネルギーを小さくする自由面の形成パターンの検討を試みる。

ここで、発破による岩盤破壊過程はおおむね次のように考えることができる（図4.1）。

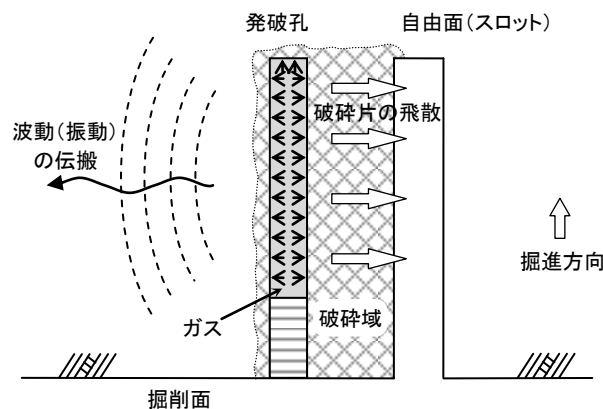


図 4.1 発破孔近傍の破壊と振動発生概念

まず、爆薬の爆ごう後、爆ごうに起因する動的応力と、高圧の爆ごう生成ガス（以下、ガスと呼ぶ）が短時間で発破孔内面に作用する。この結果として、発破孔近傍で岩盤の破壊が進展し、最終的には離散体状に破碎された岩塊が飛散する。これと同時に、周辺地山に波動が伝搬し、これが振動となる。ここで、制御発破のようなデカップリング係数（発破孔の直径／爆薬の直径、または、込物を除いた発破孔の体積／爆薬の体積）の大きな発破では、爆ごうの影響が軽減され、ガス圧の影響が相対的に大きくなる³⁾。また、ガス圧が瞬間的に作用することでも孔壁に波動が投射される⁴⁾。このため、デカップリング係数の大きな発破では、ガス圧を準静的に取り扱うことで、発破に伴う現象を工学的に評価することが可能と考える。

一方で、自由面発破のように発破孔の近傍に自由面が存在する場合、発破孔と自由面との離隔（最小抵抗線）に応じて岩盤の破碎状況や発生する振動が変化すると考えられることから、発破孔周辺の離散化を無視することができない。したがって、自由面発破の振動低減効果を表現するためには、連続体から離散体に至る一連の破碎過程と、これに伴って変化する波動伝搬エネルギー（振動）とを適切に表現することのできる解析手法が不可欠と考える。

本章では、このような解析手法として、岩盤の破壊や飛散を伴うトンネルの発破掘削を対象に、個別要素法 にもとづいた解法を構築する。さらに当該問題の適切な再現に必要な解析条件の設定について検討する。

4.2 個別要素法を用いた数値解析手法の構築

(1) 個別要素法の概要

個別要素解析では、個別要素間の接触力を図4.2に示す接触ユニットにより表現する。各要素間の接触力に加え、発破孔の壁面にガス圧 P を内圧として与える。そのもとで各個別要素に作用する合力と合モーメントを求めて運動方程式に代入する。これを陽的に時間積分し、各時間ステップにおける要素配置を更新することで、破壊の進展過程を追跡する。

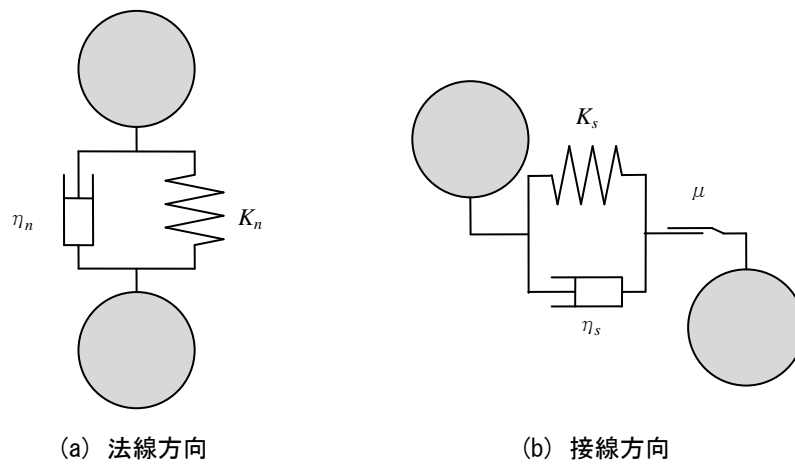


図 4.2 個別要素モデル

個別要素の法線方向破壊モデルでは、引張軟化過程を考慮する（図4.3）。図において、 σ_t は引張破壊強度、 u_t は σ_t 発生時の接触バネの伸び、 u_f は亀裂開口時のバネの伸びである。なお、 u_f は破壊エネルギー解放率 G_f を用いて $u_t + 2G_f / \sigma_t$ と与える。本解析では、要素間距離が u_f に至った時点で、要素間作用力を完全に解放する。

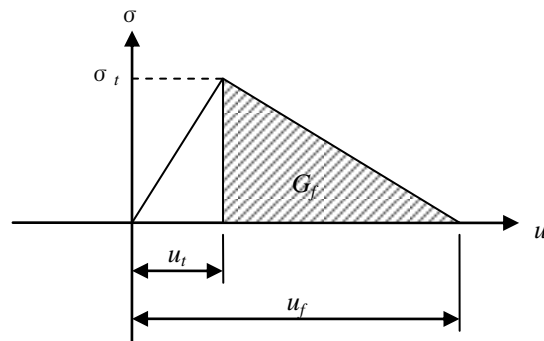


図 4.3 引張軟化モデル

また、接線方向破壊モデルでは、Mohr-Coulomb の破壊基準を採用する（図 4.4）．ここで、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である．本解析では、要素間の接線方向作用力がこの破壊基準線を越えた時点でせん断破壊とみなす．

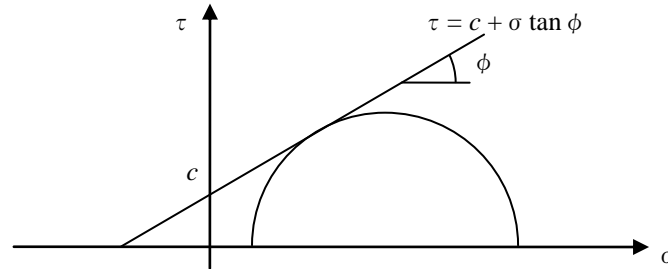


図 4.4 Mohr-Coulomb の破壊基準

(2) 各種エネルギーの評価

1) 放射波動エネルギー

発破振動を評価するため、発破により岩盤内に放射される波動エネルギー E_W を求める．放射波動エネルギーは、破壊領域の外側に設定するエネルギー評価境界上の要素における変位速度 \dot{u} と、その要素に作用する応力 σ による仕事量として次式により評価する．

$$E_W = \int_T \int_{\Gamma} \dot{u} \cdot \sigma^T \cdot \mathbf{n} \, d\Gamma \, dt \quad (4.1)$$

ここに、 \mathbf{n} はエネルギー評価境界 Γ の外向き法線方向ベクトルである（図 4.5）．時間積分の上限は、発破後の破壊が十分に進展するまでの 0.01s とする．

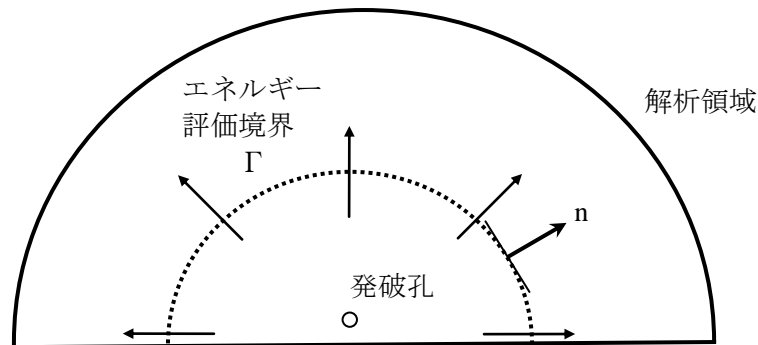


図 4.5 エネルギー評価境界

また、個別要素内の応力 σ は、要素の接触点に作用する外力から算定される巨視的応力として次式により評価する⁵⁾。

$$\sigma = \frac{1}{V_p} \sum_i a_i \otimes F_i \quad (4.2)$$

ここに、 σ は要素内の平均応力、 V_p は要素体積（面積）、 a_i は要素重心から接触点 i までの相対位置ベクトル、 F_i は接触点 i に作用する接触力ベクトルである。

2) 運動エネルギー

破壊された岩塊の運動エネルギー E_T は、エネルギー評価境界の内側の要素に関して次式で評価する。なお、算出のタイミングは、放射波動エネルギーの時間積分上限時とする。この時点では、波動が Γ 上を通過し終えているため、おおむね飛散要素の運動エネルギーと一致すると考えられる。

$$E_T = \frac{1}{2} m \cdot \dot{u}^2 \quad (4.3)$$

3) 破壊エネルギー

岩盤の破壊に費やされた破壊エネルギー E_F は、破壊と判定された要素辺の亀裂長さを s として、次式で求めた値を全亀裂について総和をとることで評価する。

$$E_F = \frac{1}{2} \sigma_f u_f s \quad (4.4)$$

4.3 解析パラメータ

個別要素法は、地盤解析の分野で多用されている有限要素法と比較して、理論や構成式が単純で明快であるが、設定するパラメータ数が多く、その設定によって解析結果が左右される。したがって、個別要素法を採用する際には、各種パラメータの設定が最も重要な問題である。本節では、設定すべきパラメータのうち、個別要素間のバネ定数および粘性係数の設定方法を示す。

(1) バネ定数

個別要素法は、もともと離散体の解析を対象としているが、要素間のバネ定数を適切に設定することで、連続体から離散体までの一連の挙動を表現することができる。本解析においても、連続体としての弾性域から離散体としての非線形域までを適切に表現する必要がある。したがって、バネ定数については、要素間のバネ定数と個別要素集合体の巨視的弾性係数の関係から理論的に設定する方法⁶⁾により次式により設定する。

$$K_n = \frac{\rho}{\gamma} \frac{G}{L} \cdot \frac{1}{1-2\nu} \cdot \frac{1}{\phi} \quad (4.5)$$

$$K_s = \frac{\rho}{\gamma} \frac{G}{L} \cdot \frac{1-4\nu}{1-2\nu} \cdot \frac{1}{\phi}$$

ここに、 K_n は法線方向バネ定数、 K_s は接線方向バネ定数、 ρ は要素の密度 (kg/m^3)、 G はせん断弾性係数 (MPa)、 γ は要素集合体の巨視的密度 (kg/m^3)、 ν はポアソン比、 ϕ は単位ラジアンあたりに存在する接触点数である。なお本研究では、個別要素の頂点数をおおむね6点とすることから、 $\phi=6/2\pi \simeq 1$ とする。また、バネ定数が各辺長に比例するよう、 L は個別要素辺の代表長さとし、 $L=0.05\text{m}$ として与える。

せん断弾性係数は媒体の弾性係数 E を用いて次式により算定する。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.6)$$

(2) 粘性係数

粘性係数 η_n , η_s は, 減衰項を有する振動方程式から求まる次式の値を目安とする^{7),8)}.

$$\begin{aligned}\eta_n &= 2h\sqrt{mK_n} \\ \eta_s &= \eta_n\sqrt{s}\end{aligned}\tag{4.7}$$

ここに, h は減衰定数, m は要素の質量, s は K_s に対する K_n の低減率 ($s = K_s/K_n$) である. なお, 減衰定数は離散化前と離散化後とに分けて以下のように求めることとする.

1) 離散化前

離散化していない領域における減衰定数 h は, 対数減衰率 δ を用いて次式により算出する (図 4.6).

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{y_m}{y_{m+n}} \right)\tag{4.8}$$

$$h = \delta / 2\pi\tag{4.9}$$

2) 離散化後

破壊域において破砕片どうしの減衰定数 h は, 代表的なサイズの破砕片を用いた落下実験 (図 4.7) から反発係数 e を求めることにより算定する⁹⁾.

$$h = \sqrt{\frac{(\ln e)^2}{\pi^2 + (\ln e)^2}}\tag{4.10}$$

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}\tag{4.11}$$

ただし, 個別要素間の減衰では, 摩擦や部分的破砕などによる粘性以外の要因も含まれるとともに, 解析の安定性を確保するという非物理的な意味合いも含まれることを考慮して総合的な判断で設定する.

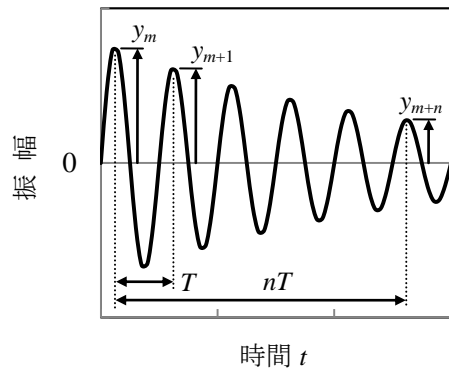


図 4.6 対数減衰率

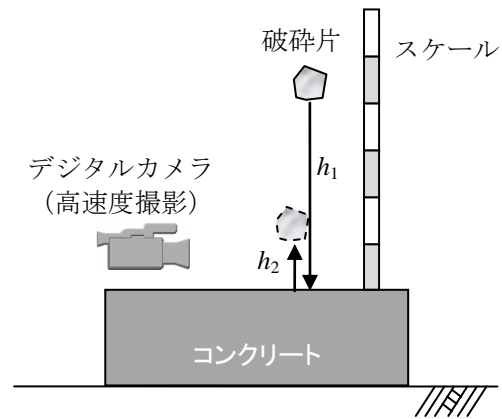


図 4.7 落下実験の概要

4.4 解析条件

(1) 要素サイズ

個別要素法では、要素サイズが解析結果に対して大きな影響を与える。粗いメッシュでは細かい破壊挙動を再現できないが、あまり細かいメッシュでは解析コストの面で問題が大きい。そこで、要素サイズを決めるにあたっては、発破掘削における実際のトンネル掘削ずりの粒度分布が参考になると考える。

発破による掘削ずりの粒度分布については、いくつかの研究事例が存在する。Cho ら¹⁰⁾、広島ら¹¹⁾は、掘削ずりの粒度分布は、発破パターン（爆薬量、発破孔の間隔、最小抵抗線長）によって変化し、発破孔の間隔が狭くなると粒度は小さくなることを示している。

具体的な粒度分布の推定方法として、福井ら¹²⁾は、トンネルの掘削方法ごとに掘削ずりの粒度分布を整理し、掘削方法が違っても粒度分布曲線 *CDF* (cumulative distribution function) の形状はあまり変化しないことを示したうえで、代表寸法（発破掘削の場合は平均削孔間隔）が分かれば、Rosin-Rammler 分布を用いて次式のように粒度分布を推定できることを明らかにしている。

$$CDF = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{1.87D}{L} \right)^{0.88} \right\} \quad (4.12)$$

ここに、 D は粒径、 L は平均削孔間隔（ $\sqrt{\text{掘削断面積} / \text{削孔数}}$ ）である。典型的なトンネル掘削断面積と削孔数を想定すると、平均粒径 D_{50} は約 200mm と算定される（図 4.8）。

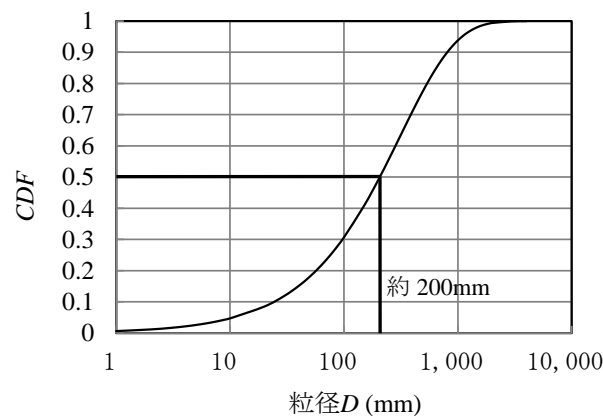


図 4.8 掘削ずりの推定粒径加積曲線

一方、手塚ら¹³⁾は、地下発電所工事において、発破個所近傍の損傷状況として、発破後の地山側における亀裂密度を調査している。これによると、発破面から 30cm 範囲は細かく破碎され亀裂密度は 7 本以上/(10cm×10cm)、30～50cm 範囲では亀裂は 2～7 本/(10cm×10cm)、50cm～1m 範囲では損傷はわずかであり、1m 以降では損傷なかったと報告されている。

以上の研究事例を参考にして、本研究では、発破孔近傍のメッシュを密に、外側に離れるほどメッシュを粗く設定することとした。具体的には、

- ・発破孔周辺の半径約 30cm の範囲では要素サイズを $\phi 20\sim 50\text{mm}$
- ・半径約 30cm～1m の範囲では $\phi 200\text{mm}$ 以下

とした (図 4.9)。

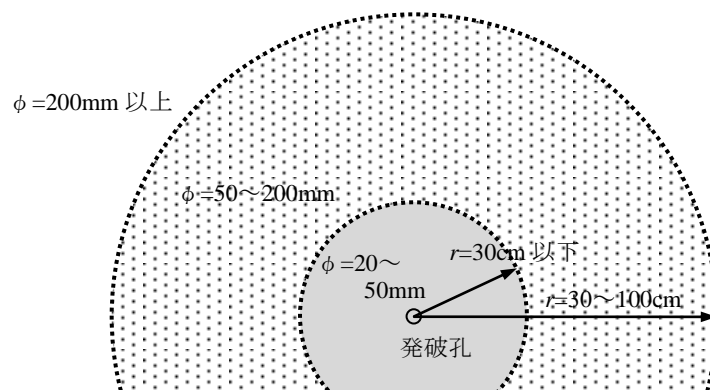


図 4.9 要素サイズの設定

(2) 要素分割法

通常、岩盤には節理や層理等の不連続面が存在しており、これらの不連続面の発達方向や力学特性は、岩盤の変形や破壊時の挙動に影響を与えられとされる。しかしながら、これら不連続面の分布を事前に把握することはきわめて困難である。

また、一般的な数値解析の実務では、三角形や四角形要素で解析領域を分割することが多いが、この場合、亀裂発生パターンや波動伝搬に対して、要素形状や分割法に起因して

特定の方向性が現れる可能性もある。

このため、自然岩盤における亀裂発生・発達のランダム性を考慮するとともに、要素分割法に起因する波動伝搬の指向性をキャンセルするため、要素分割法にはボロノイ分割法を適用する。ボロノイ分割は、様々な用途に適用されているが、岩盤を対象とした個別要素法においても、亀裂の不規則性を考慮するために適用されている¹⁴⁾。

ボロノイ分割のアルゴリズムは次のとおりとする。まず、図 4.10(a)のように、 r および θ を乱数として与えることで、ランダムに配置した母点を設定する。次に、隣り合う母点どうしを結ぶ直線に垂直二等分線を引く(図 4.10(b))。この垂直二等分線に囲まれた領域がボロノイ領域であり、分割された要素となる(図 4.10(c))。

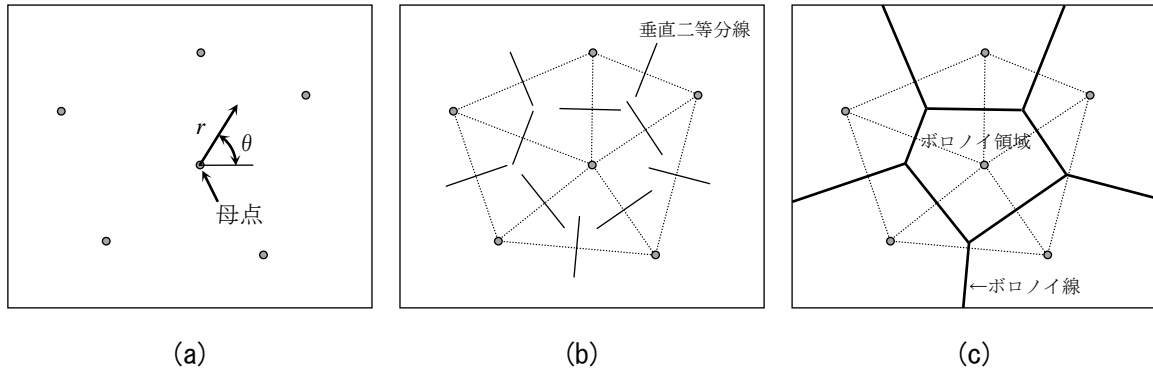


図 4.10 ボロノイ分割の作成要領

(3) 時間増分

個別要素法は、時間領域で数値積分する手法であるため、得られる結果に対して時間増分 Δt が大きな影響を及ぼす。 Δt が大きいと、計算コストの低減には寄与するが、離散化による誤差が大きくなるだけでなく、解が発散するなど解析の安定性も確保できなくなる。このため、適切な Δt を用いて解析する必要がある。

Δt の設定にあたっては、偏微分方程式を差分法で時刻歴で解析する場合における解析の安定を図るための CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件を満足するよう、次式を目安とする¹⁵⁾。

$$\Delta t < \frac{D_{\min}}{V} \quad (4.13)$$

ここに、 D_{\min} は隣接する要素間の最小距離、 V は波動伝搬速度である。上式の意味は、 Δt 間に伝搬する波動が隣接する要素を通り越すと、要素に大きな反力と加速度が作用して解析が発散するというものである。ただし、CFL 条件を満足しても解析が不安定になることもあるので、これよりも十分小さく設定する。

$D_{\min} = 20 \text{ mm}$, $V = 4,000 \sim 6,000 \text{ m/s}$ とすると、 $\Delta t = 3 \sim 5 \times 10^{-6} \text{ sec}$ となるが、安全のため、 $\Delta t = 1 \times 10^{-8} \text{ sec}$ 程度を採用する。

4.5 ガス圧の取扱い

ここでは、ガスの圧力波形を特徴づけるガスの最大圧力およびガス圧が最大値に達するまでの時間（以下、立ち上がり時間と呼ぶ）について示す。

(1) ガスの最大圧力

ガスの最大圧力については、使用実績の多い JWL 状態方程式¹⁶⁾と Abel-Nobel 状態方程式¹⁷⁾を以下に示す。

JWL 状態方程式では、発破孔内に作用するガス圧 P は次式で表される。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (4.14)$$

ここに、 A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 、 ω は爆薬固有の定数であり、試験により測定されるものであるが、KHT コード¹⁸⁾で求めることもできる。 V は比体積（発破孔体積 v / 爆薬体積 v_0 ）であり（図 4.11）、 E は単位体積あたりの内部エネルギーである。

第5章の発破実験で使用した含水爆薬について、KHT コードを用いて算出した JWL パラメータを表 4.1 に示す。

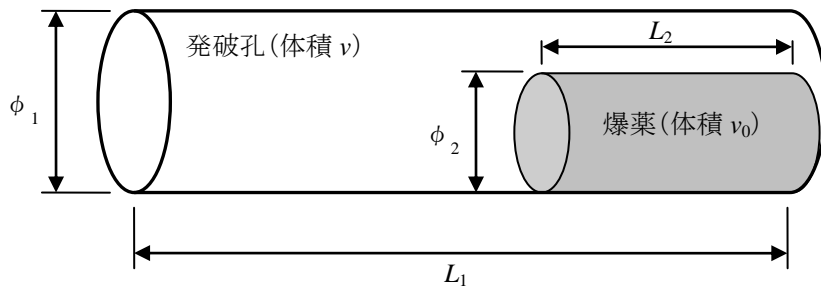


図 4.11 比体積

表 4.1 JWL パラメータ

A (Mbar)	B (Mbar)	C (Mbar)	R_1	R_2	ω	E (Mbar.cc/cc)
3.78476	0.07692	0.01038	5.69554	1.49356	0.29525	0.03364

一方，Abel-Nobel の状態方程式では，ガス圧 P は次式で表される．

$$P = \frac{f \cdot L}{v - \alpha \cdot L} \quad (4.15)$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_e} \quad (4.16)$$

ここに， f は火薬力， L は爆薬量， v は爆薬体積， α は爆薬のコボリウム， ρ_e は爆薬の密度である．

ここで，装薬条件を仮定して両式について試算した結果を表 4.2 に示す．

検討条件：

発破孔径 $\phi_1 = 52 \text{ mm}$ ， 装薬長 $L_1 = 775 \text{ mm}$
 爆薬径 $\phi_2 = 25 \text{ mm}$ ， 爆薬長 $L_2 = 175 \text{ mm}$
 爆薬量 $L = 0.1 \text{ kg}$
 火薬力 $f = 8600 \text{ L} \cdot \text{kgf/cm}^2 / \text{kg}$ （メーカー資料より）
 爆薬比重 = 1.13 （メーカー資料より）

表 4.2 ガス圧の試算結果

	比体積 V	コボリウム $\alpha \text{ (L/kg)}$	ガス圧 (MPa)	備考
JWL 状態方程式	19.16	—	51.8 ①	—
Abel-Nobel 状態方程式	—	0.54	55.1	—
発破実験からの推定値（5章）	—	—	575 ②	②／① ≈ 11.1

両式から得られたガス圧はおおよそ同等の値を示している．しかしながら，同じ条件で実施した発破実験において推定されたガス圧（第5章参照）は，これらより1オーダー大きな値であり，乖離が見られる．

この理由としては，一般に使用されている含水爆薬は，爆薬の薬径や，密閉強度等の装薬条件に大きく依存する非理想爆薬であることが考えられる．また，含水爆薬は，気泡保

持剤等の不活性成分を含んでいるが、気泡体の大きさや量が反応特性に影響を与えることによって、実際の爆轟圧力と理論計算値との乖離が大きくなることが知られている¹⁹⁾。ガス圧についても、同様の乖離が発生するものと考えられる。状態方程式では、このような影響を考慮していないため、算出された結果と実験での推定値とで乖離が発生しているものと考えられる。とくに、発破実験では、いわゆる“鉄砲”にならないよう十分にステミングを行ったことや、設定した装薬条件は体積デカップリング係数が約 19.16 と比較的大きくなっており、状態方程式でガス圧が小さく算出されてしまったと考えられる。

したがって、以降のガス圧の設定にあたっては、発破実験の結果から推定されたガス圧を確からしいものとして使用する。爆薬量を変えるなど装薬条件を変更する場合は、JWL 状態方程式における比体積 V に応じたガス圧の変動を考慮し、次式により算出する。

$$P = P_0 \frac{P_{JWL}}{P_{JWL_0}} = 5.75 \times 10^8 \text{ Pa} \times \frac{P_{JWL}}{P_{JWL_0}} \quad (4.17)$$

ここに、 P_0 はコンクリート試験体を用いた発破実験結果から同定した最大圧力（第5章参照）、 P_{JWL} は JWL 状態方程式により算出されるガス圧、 P_{JWL_0} は発破実験の条件で JWL 状態方程式により算出されるガス圧とする。これにより発破条件を変えて算定したガス圧を表 4.3 に示す。

表 4.3 ガス圧の試算結果

	ϕ_1 (mm)	L_1 (mm)	ϕ_2 (mm)	L_2 (mm)	薬量 (g)	V (cm ³)	v_0 (cm ³)	V	P_{JWL} (MPa)	P_0 (MPa)	P (MPa)	備考
発破実験	52	775	25	175	100	1645.9	85.9	19.16	51.8	575	575	5章
爆薬 200g	45	500	30	200	200	795.2	141.4	5.62	176.4	—	1,958	スパーサー 1本
爆薬 400g	45	700	30	400	400	1113.3	282.7	3.94	257.0	—	2,853	

(2) 立ち上がり時間

立ち上がり時間については、第3章で述べたとおり、これが応力状態や破壊形態に影響を与えるにもかかわらず、既往の研究ではその設定根拠は明確でない。

第5章に示す発破実験では、計測された応答加速度を用いた逆解析により、立ち上がり

時間 $a = 1.33 \times 10^{-4} \text{s}$, 圧力減少時間係数 $b = 2.75$ を得ている (図 4.12). 発破実験は制御発破を想定したデカップリング係数の大きな軽装薬の発破であるが, 本論文では, 同様の条件のもと, この立ち上がり時間を使用する.

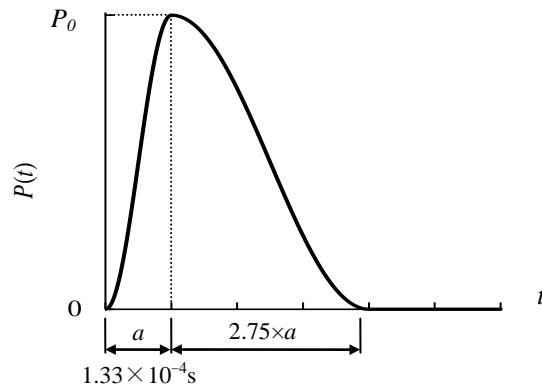


図 4.12 ガスの立ち上がり時間と圧力減少時間係数

第4章の参考文献

- 1) 上西幸司, H.P.Rossmann, N.Kouzniak : 爆速および起爆法が発破孔近傍の岩盤の動的挙動に与える影響について, 火薬学会誌, Vol.61, No.6, pp.254-259, 2000.
- 2) 社団法人 火薬学会 : エネルギー物質ハンドブック 第2版, 共立出版, p.410, 2004.
- 3) 伊藤一郎, 佐々宏一 : スムースブラस्टィングにおける破壊機構の一考察, 日本鉱業会誌, Vol.84, No.964, pp.1059-1065, 1968.
- 4) 伊藤一郎, 佐々宏一, 谷本親伯 : 爆破による岩石の破壊機構 (主としてガス圧による破壊), 材料, Vol.20, No.209, pp.203-208, 1971.
- 5) 阿部和久, 後藤嘉雄 : 個別要素集合体の巨視的応力度の評価, 計算工学講演会論文集, 1, pp.913-916, 1996.
- 6) 阿部和久 : 個別要素法による連続体解析におけるバネ定数の設定, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.83-90, 1996.
- 7) 大町達夫, 荒井靖博 : 個別要素法で用いる要素定数の決め方について, 構造工学論文集, vol.32A, pp.715-723, 1986.
- 8) 木山英郎, 藤村尚 : カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文集, vol.333, pp.137-146, 1983.
- 9) 表真也, 岡田慎哉, 日下部祐基 : 落石シミュレーションの定数設定法に関する検討, 岩盤力学に関するシンポジウム講演集, Vol.38, pp.29-34, 2009.
- 10) Sang Ho Cho, Masaaki Nishi, Masaaki Yamamoto and Katsuhiko Kaneko : Fragment Size Distribution in Blasting, Materials transactions, Vol.44, No.5, pp.951-956, 2003.
- 11) 廣島隆, 大久保誠介, 福井勝則, 箆橋広文, 西崎晶士 : トンネル掘削における発破ずりの粒度分布, トンネル工学報告集, Vol.14, pp.181-186, 2004.
- 12) 福井勝則, 陳文莉, 大久保誠介, 皿田滋 : トンネル掘削におけるずりの粒度分布, 資源と素材, Vol.119, No.10,11, pp.640-646, 2003.
- 13) 手塚昌信, 蓮井昭則, 工藤洋三, 中川浩二 : 発破による爆破点近傍岩盤の損傷に関する一考察, 土木学会論文集, No.602/VI-40, pp.139-144, 1998.
- 14) 大西有三, 河野正雄 : ボロノイ分割法を適用した岩盤の個別要素解析について, 土木学会論文集, No.376/III-6, pp.231-239, 1986.
- 15) 伯野元彦 : 破壊のシミュレーション—拡張個別要素法で破壊を追う—, 森北出版, pp.49-51, 1997.
- 16) デトネーション研究会 : デトネーションの熱流体力学 1, 基礎編, 理工図書, pp.157-158, 2011.

- 17) 石井康夫, 西田佑, 中野雅司, 坂野良一: 最新 発破技術, 森北出版, pp.74-75, 1984.
- 18) 田中克巳: 爆薬の爆ごう特性解析, 工業技術院化学技術研究所, 1983.
- 19) 廣崎義一, 村田健司, 加藤幸夫, 伊東繁: エマルション爆薬の爆轟特性 (第4報) 一気泡の大きさおよび量と爆轟圧力, Vol.62, No.2, pp.64-72, 2001.

第5章

自由面発破の実験と再現解析

5.1 発破実験の目的

第4章では、個別要素法を用いた数値解析手法について記述した。当該手法は、発破問題だけでなく幅広い分野で適用されており、破壊挙動のシミュレーションにおいては信頼性が高いと考えられるが、第3章で記述したとおり、発破時における動的破壊と振動伝搬の挙動を同時にシミュレーションした事例は見あたらない。今後、当該手法を実務に適用するためには、解析手法の妥当性検証が必要と考える。

このためには、十分に把握されていない実現象としての自由面発破の破壊挙動および波動伝搬傾向を明らかにすることも不可欠と考えた。これまで、自由面発破において、高い振動低減効果は数多く報告されているものの、振動低減効果の定性的かつ定量的な議論が十分になされていないためである。これは、発破時における破壊や振動の挙動を実施工あるいは実験によって計測しようとする、多大な労力が必要なためと考えられる。

そこで、試験体を用いた発破実験を実施し、自由面発破における破壊挙動と波動伝搬傾向を明らかにすることとした。さらに、得られた計測データを利用して数値解析の結果に影響を与えるパラメータの同定を行うとともに、再現解析を行うことで解析手法の妥当性について検証した¹⁾。

当該の自由面発破実験では、

- 1) 発破孔近傍の破壊挙動
- 2) 試験体外周での振動発生傾向
- 3) 発破孔内におけるガスの圧力挙動

の確認を主な目的とした。

5.2 発破実験の概要

発破実験は、周辺への影響を回避する必要があるため、ジークライト(株)所有の最終処分場（エコポート）に隣接する平地を借りて実施した。以下、発破実験の概要を示す。

(1) 実験概要

・実験場所

ジークライト(株) 漬場沢堆積場（写真 5.1）

山形県米沢市大字板谷字漬場沢 772-4

・実験日時

2014 年 10 月 28 日（火）



写真 5.1 発破実験計画地

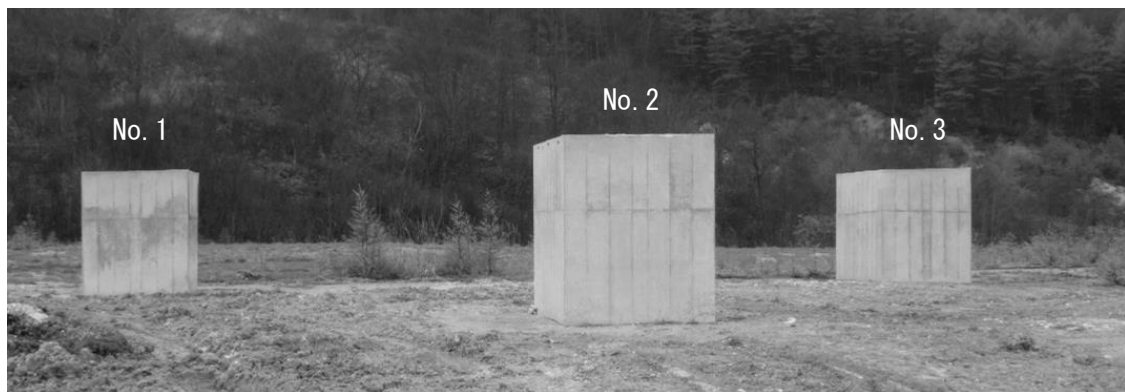


写真 5.2 試験体全景



(a) 型枠



(b) 養生（脱型前）



(c) 養生（脱型後）

写真 5.3 試験体作成状況

(2) 試験体および発破条件

1) 試験体

発破実験に供した試験体は、破壊挙動や振動を捉えやすくするため、無筋のコンクリート製とした。試験体の材料物性値を表 5.1 に、試験体形状と発破孔の位置を図 5.1 に示す。形状は、汎用の鋼製型枠で製作できる限度として幅 2.0m×奥×3.0m×高 2.5m とし、これを 3 体製作した。

試験体の製作にあたっては、内部に不連続面をつくらないことが重要であることから、コンクリートの打設および締固めにあたっては十分に配慮するとともに、温度応力解析の結果をふまえた断熱養生を行った（写真 5.3）。結果、顕著なジャンカやひび割れの無い試験体とすることができた。

表 5.1 試験体の物性値

項 目		単 位	物 性 値	備 考
密 度	ρ	kg/m ³	2,390	JIS A 1108
圧縮強度	σ_c	N/mm ²	39.6	JIS A 1108
割裂引張強度	σ_t	N/mm ²	3.75	JIS A 1113
弾性係数	E	MN/m ²	32,500	JIS A 1149
縦波伝搬速度	V_p	m/s	4,010	衝撃弾性波法 ²⁾

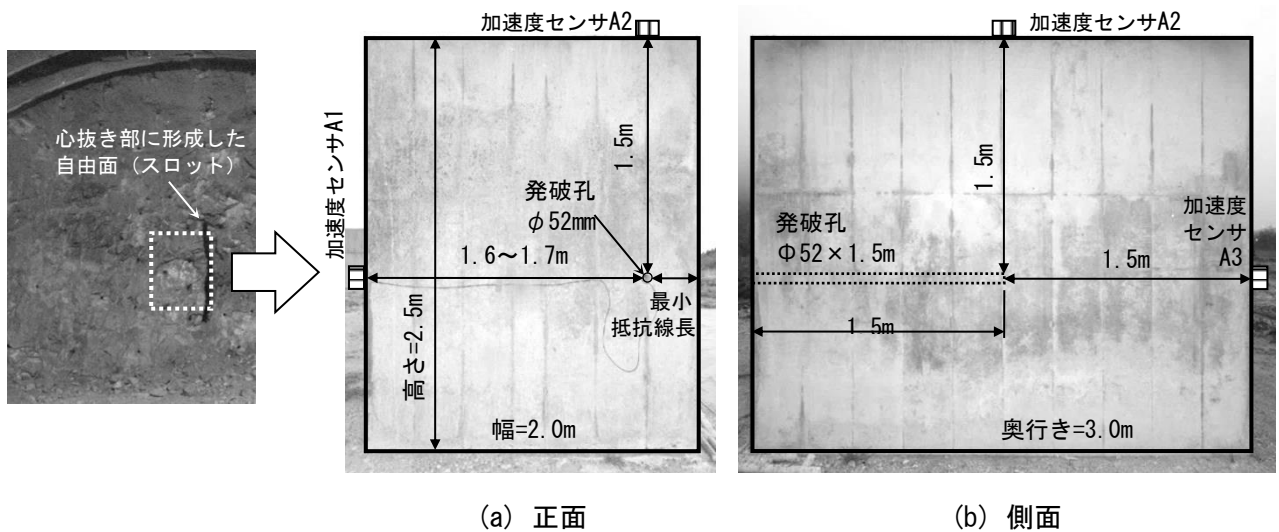


図5.1 試験体と発破孔の概要

2) 発破条件

実施した発破の諸元を表 5.2 に示す。発破孔の位置は、試験体の外周面において発破孔から等距離で振動を捉えられるように設定し、試験体製作後、コアカッターにより $\phi 52\text{mm} \times 1,500\text{mm}$ の空孔を削孔して、これを発破孔とした。

爆薬は含水爆薬（ $\phi 25\text{mm}$ ，50～100g）とし（写真 5.4，表 5.3），雷管は瞬発雷管を使用した。また，制御発破を念頭におき，デカップリング係数の大きな発破とするために装薬時にはスペーサ（ $L=300\text{mm} \times 2 \sim 3$ 本）を使用した。

表 5.2 発破の諸元

No.	最小抵抗線長	爆 薬	スペーサ
1	30cm	$\phi 25\text{mm}$ 100g	30cm \times 2
2	40cm	$\phi 25\text{mm}$ 50g	30cm \times 3
3	40cm	$\phi 25\text{mm}$ 100g	30cm \times 2

写真 5.4 含水爆薬³⁾表 5.3 爆薬カタログ値³⁾

項目	製品名	ハイジェックス 紙巻品	ハイジェックス プラスチックチューブ品
状態・包装		膠質・紙包装	膠質・プラスチックチューブ包装
仮比重		1.10～1.20	1.10～1.30
爆速〔JIS法〕(m/s)		5,500～6,000	
弾動振子(mm)		74～80	
砂上殉爆度(径倍)		2.5～5.0	
低温起爆感度		-25℃で完爆	
耐水・耐吸湿性		優 秀	
落槌感度〔JIS法〕(級)		8	
後ガス		最優秀	

(3) 計測システム

発破実験にあたって、振動伝搬の傾向とガス圧の確認を行うため、表 5.4 および図 5.2 に示す計測システムを構築した。また、発破実験の全景を写真 5.5 に示す。

発破による動的破壊は高速かつ複雑な挙動であるため、これを計測で捉えることには限界がある。加速度センサの選定にあたっては、発破によるエネルギーが大きいことや、試験体のサイズに起因して波動の到達時間が短いことを考慮して、衝撃に強くかつ応答周波数が高いものを選定した。ただし、市販センサの限界も顕在化した。すなわち、発破孔から加速度センサまでの距離 1.5～1.7m と縦波伝搬速度 $V_p = 4,010 \text{ m/s}$ （実測）より、第 1 波目の到達時間は $4 \times 10^{-4} \text{ s}$ 程度と算定されるが、これに対してセンサの応答周波数 5kHz とサンプリング周波数 10kHz ($1 \times 10^{-4} \text{ s}$) は、対象とする現象に対して時間分解能が必ずしも十分でないことに注意を要する。

試験体の破壊挙動については、デジタルカメラによって高速撮影した動画（480 fps : 1 秒間に 480 フレーム）より確認した。また、発破完了後における亀裂等の破壊状況は、目視観察とともに、亀裂の方向、幅、長さを正確に抽出するために、亀裂抽出ソフト「Kuraves-Actis」を併用して確認した。

表 5.4 計測システム

項 目	使 用 機 器	備 考
加速度センサ	(株)東京測器研究所 ARE-10000A	容量 $10,000 \text{ m/s}^2$ (1,020 G) 応答周波数 5 kHz
ガス圧センサ	(株)東京測器研究所 PWFC-50MPB	容量 50 MPa
データレコーダ	(株)東京測器研究所 TMR-200	サンプリング周波数 10 kHz
デジタルカメラ	CASIO EXILIM EX-ZR1100	高速モード 480 fps

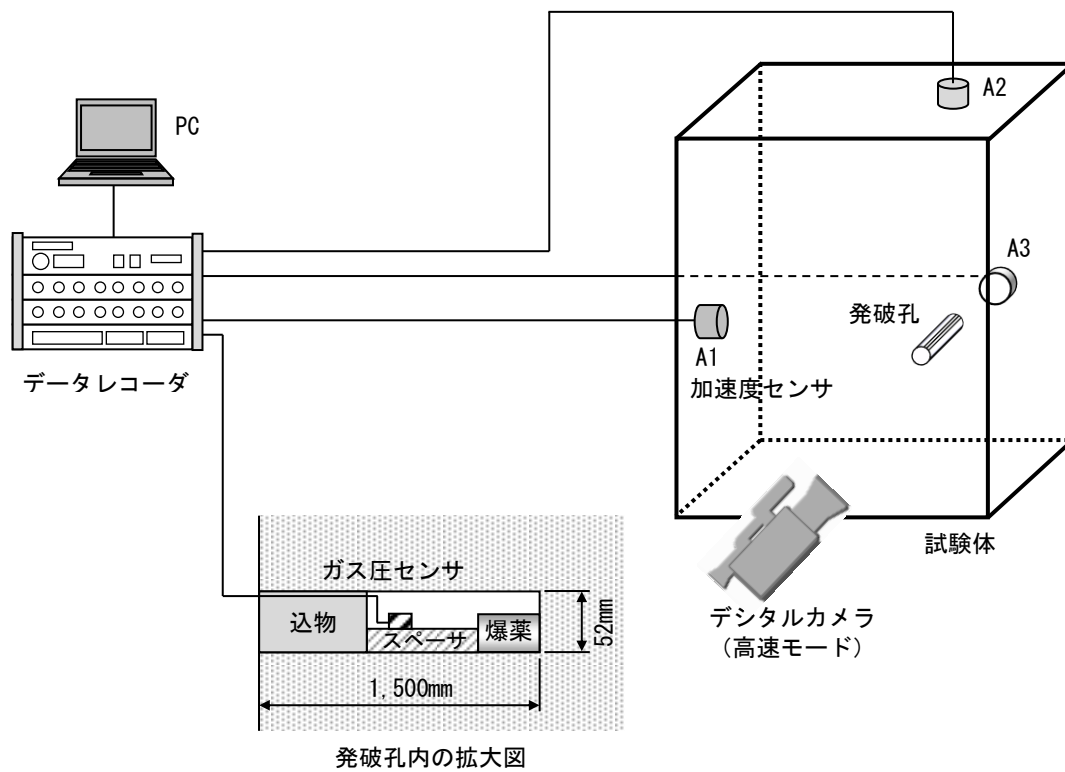


図 5.2 計測システムの概要



写真 5.5 発破実験の実施状況

5.3 発破実験の結果

発破実験の結果概要を表 5.5 に示す。3 回実施した発破実験では、それぞれ何らかの計測不良が発生しているが、全体としておおむね破壊挙動を捉えることができたと考える。なお、ガス圧センサについては、破壊の進展に伴うケーブルの破断で計測不能となったため、ここでは議論の対象外とする。

表 5.5 発破実験の結果概要

No	結果概要
1	<ul style="list-style-type: none"> ・発破器の接触不良により計測の実施ができなかった。 ・ガスの白煙により動画の視界がやや不良であった。
2	<ul style="list-style-type: none"> ・発破が“鉄砲”になり試験体が破壊しなかった。 ・加速度の計測は問題なし。ガス圧センサで計測不良が発生した。
3	<ul style="list-style-type: none"> ・加速度センサ A2 とガス圧センサで計測不良が発生した。 ・動画撮影は良好に実施できた。

(1) 破壊状況

発破後の破壊進展状況を写真 5.6 に、破壊完了後の状態を写真 5.7 および 5.8 に示す。顕著な亀裂は、発破孔を中心として最小抵抗線側の右斜め上と右斜め下方向、鉛直上向き方向および左斜め下方向に発生している。その他、No.1 試験体のみ左水平方向にも亀裂が発生している。これらが時間の経過とともに発達し、最小抵抗線側の領域が剥離するように飛散している。これらの破壊面はおおよそ発破孔と平行である。

試験体に残った亀裂のうち、左斜め下方向に発生している亀裂は、No.1 試験体で亀裂幅が最大 10mm 以上、No.3 でも最大 5mm 以上と大きい。No.1 のみに発生した左水平方向の亀裂は、幅が 0.05～0.4mm と比較的微細であり、しかも端面にまで達していない。

一方、発破孔の奥行き方向に対しては、発破孔の先端から約 45° 方向に破壊面が現れているが、その他の顕著な亀裂は見受けられない。このような挙動は試験体 No.1 および No.3 で同様であった。

以上のことから、試験体の破壊形態は厳密には 3 次元的であるが、奥行き方向に対して

一爆破進行長（切羽から発破孔先端まで）の範囲においては，破壊面は発破孔とほぼ平行であり，自由面近傍の破壊挙動は2次元的な議論が可能と考える．

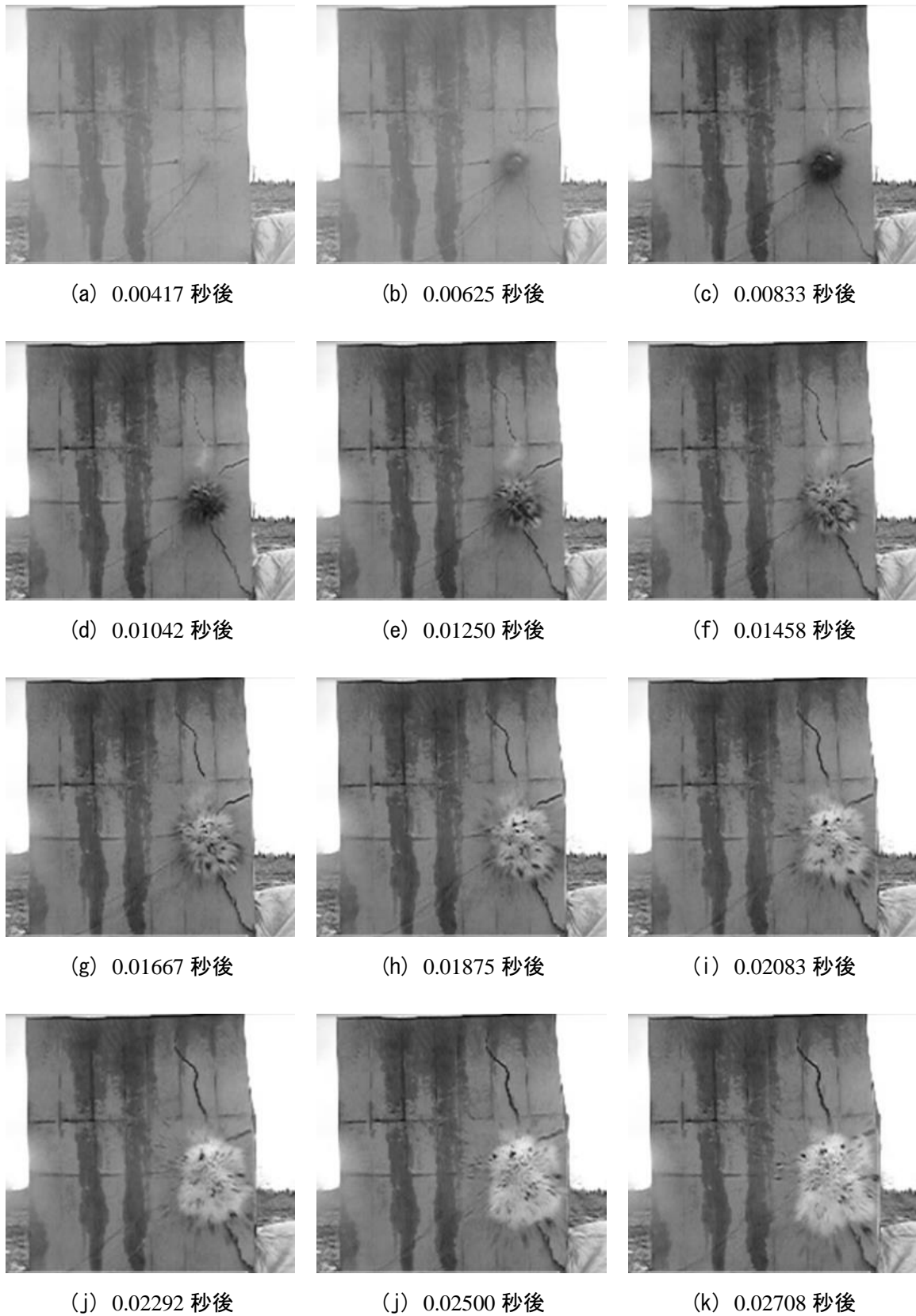
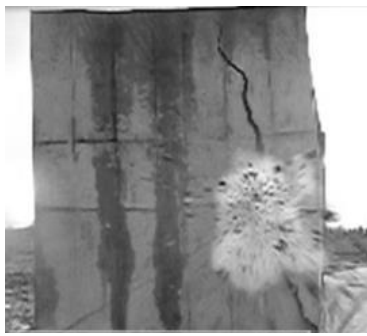
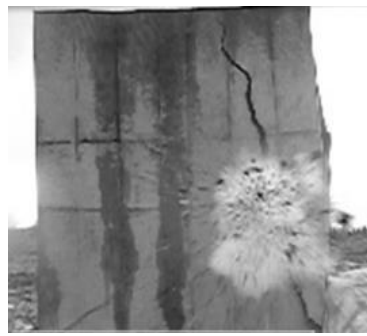


写真 5. 6(1) 爆ごう直後の破壊進展状況 (No.3 試験体)



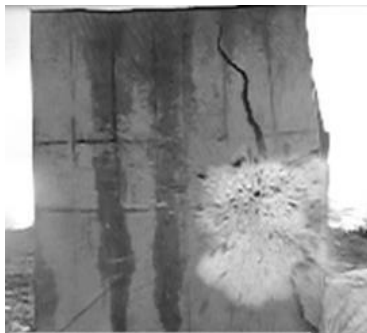
(l) 0.02917 秒後



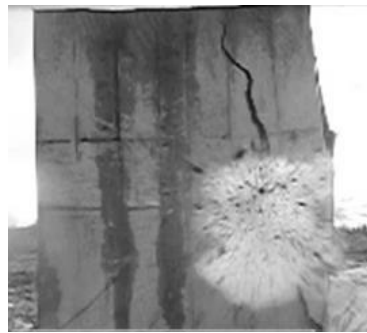
(m) 0.03125 秒後



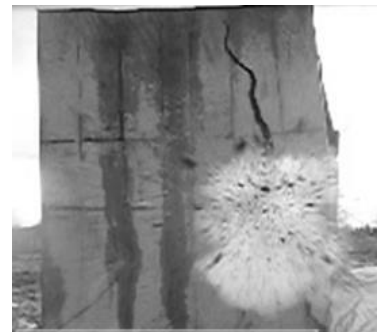
(n) 0.03333 秒後



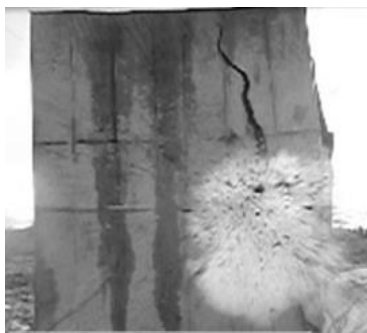
(o) 0.03542 秒後



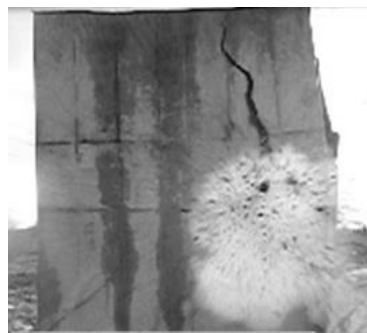
(p) 0.03750 秒後



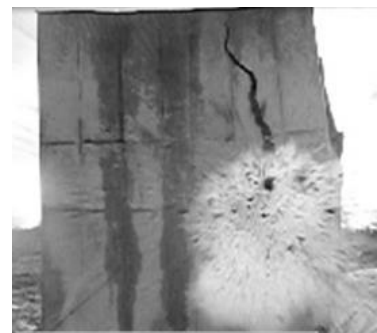
(q) 0.03958 秒後



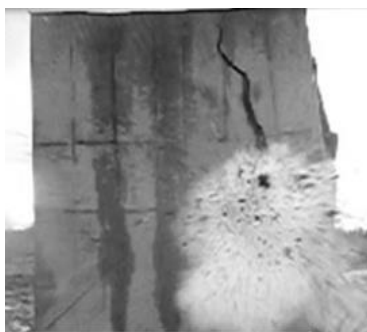
(r) 0.04167 秒後



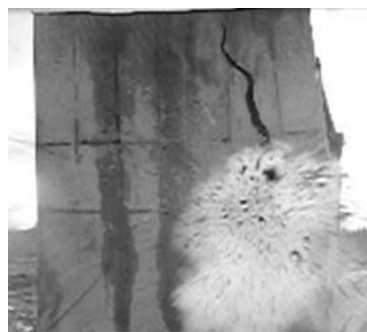
(s) 0.04375 秒後



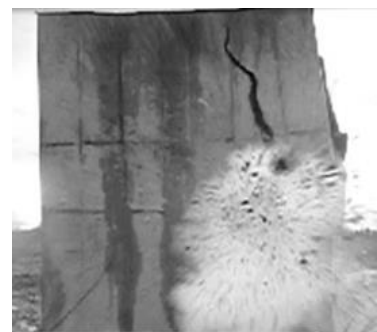
(t) 0.04583 秒後



(u) 0.04792 秒後

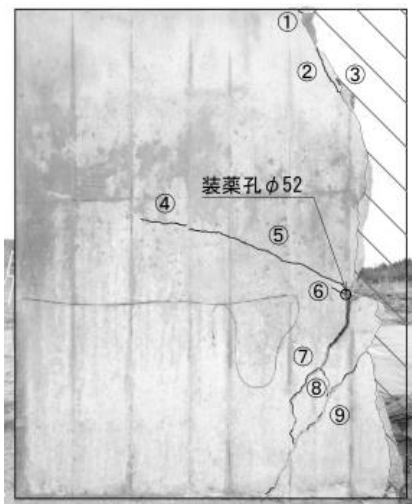


(v) 0.05000 秒後

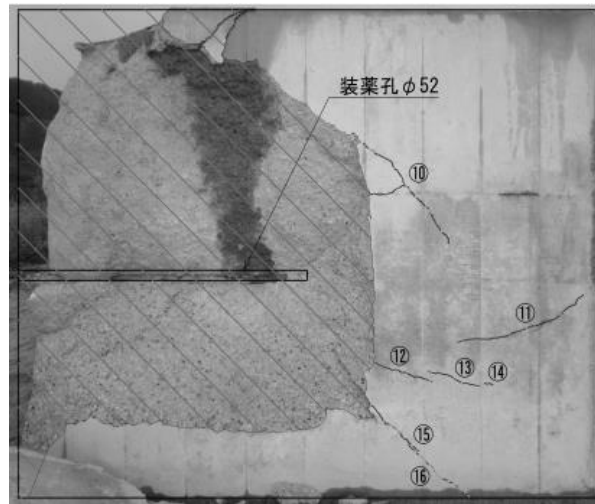


(w) 0.05208 秒後

写真 5. 6 (2) 爆ごう直後の破壊進展状況 (No.3 試験体)

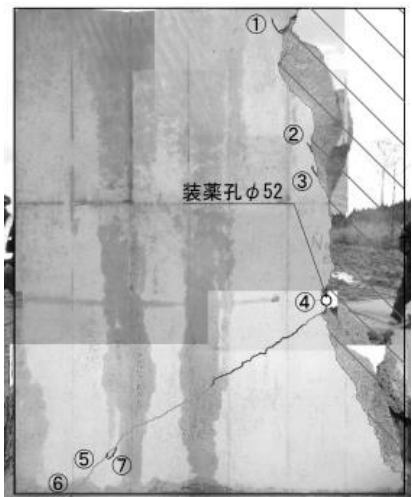


(a) 正面

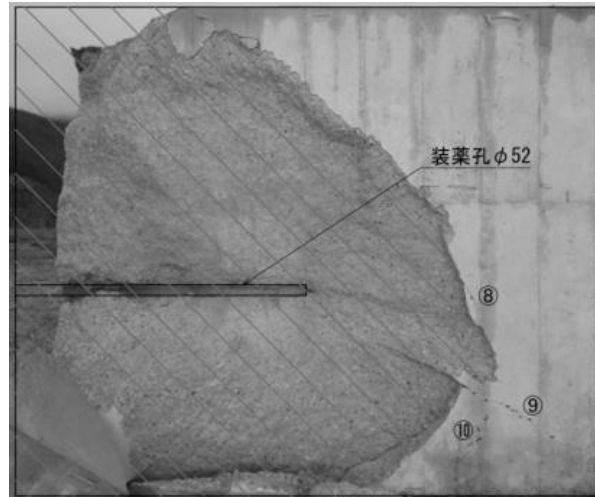


(b) 側面

写真 5.7 試験体の破壊状況 (No.1 試験体)



(a) 正面



(b) 側面

写真 5.8 試験体の破壊状況 (No.3 試験体)

(2) 加速度

試験体外周で計測された加速度波形を図 5.3 および 5.4 に示す。ここで、No.2 試験体については、“鉄砲”により破壊していないため、波動の伝搬傾向を確認するうえで参考にすることはできるが、本研究で目的としている自由面側の破壊の影響が含まれていない。このため、No.2 試験体と No.3 試験体との単純な比較はできない。

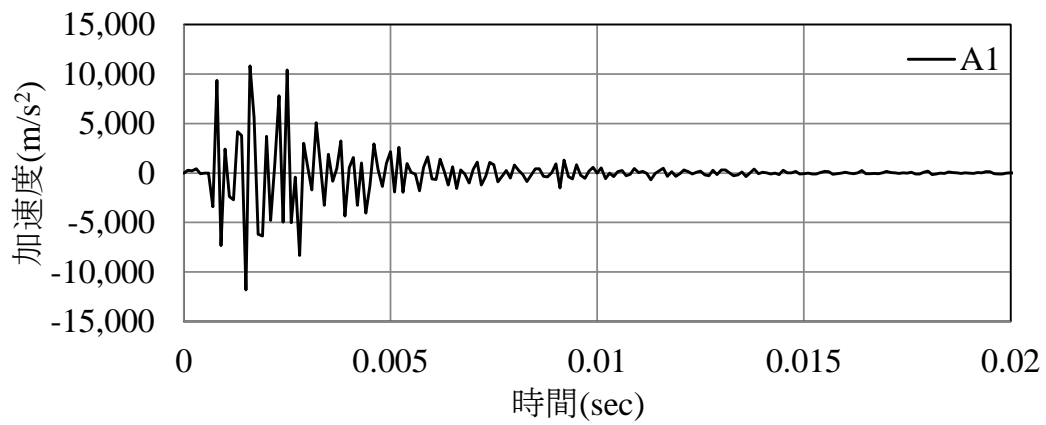
また、いずれのデータにおいても第一波目のピークが小さくなっているが、これは、加速度センサの応答周波数が十分でなかったためと考えられる。また、第一波目以降には、試験体の大きさに起因して、反射波成分も含まれていることに注意する必要がある。

計測された波形は全般的に側部 A1 の振幅より前方 A3 の振幅が大幅に小さくなっている。この傾向は No.2 および No.3 試験体で共通であり、最も小さな前方 A3 は側部 A1 の 25～40%程度とかなり小さい。このことより、自由面発破によって周辺に放射される波動の強さは、全方向に同等に伝わるのではなく、前方方向に対して小さくなる指向性の存在がうかがえる。なお、頂部 A2 については、ピーク値は A1 データと同等であるが、No.2 試験体で計測されているのみでありデータ数が少ないことから、その振幅値については、ここでは考察しないこととする。

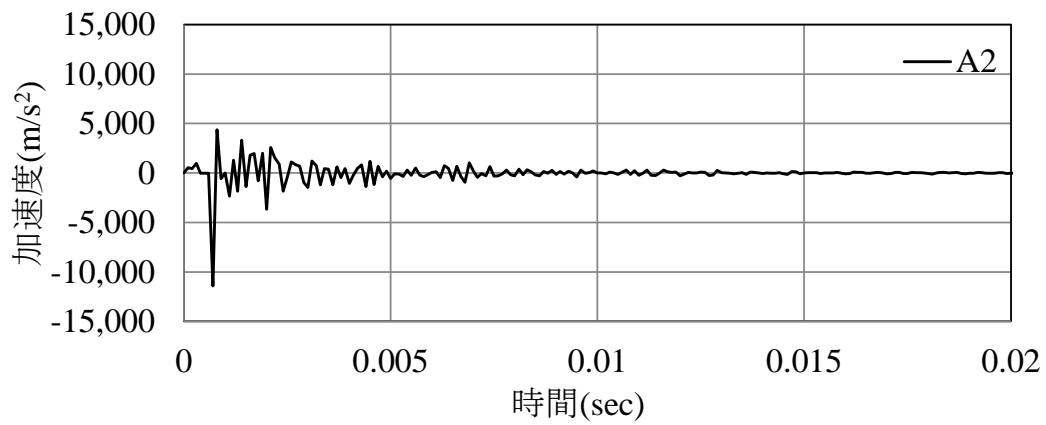
発破に伴う波動は、発破孔の内壁面にガス圧が瞬時に作用することで発生するが、発破孔自体は細長い円筒形であり、側面に対して孔尻の面積は非常に小さく、面積比率として発破孔前方に作用するエネルギーが小さいためと考えられる。

ただし、第一波目のピークが捉えられていないことや、No.2 試験体は破壊に至っていないことなど、計測データが限定的であることから、このような指向性の存在はここでは推測にとどめる。

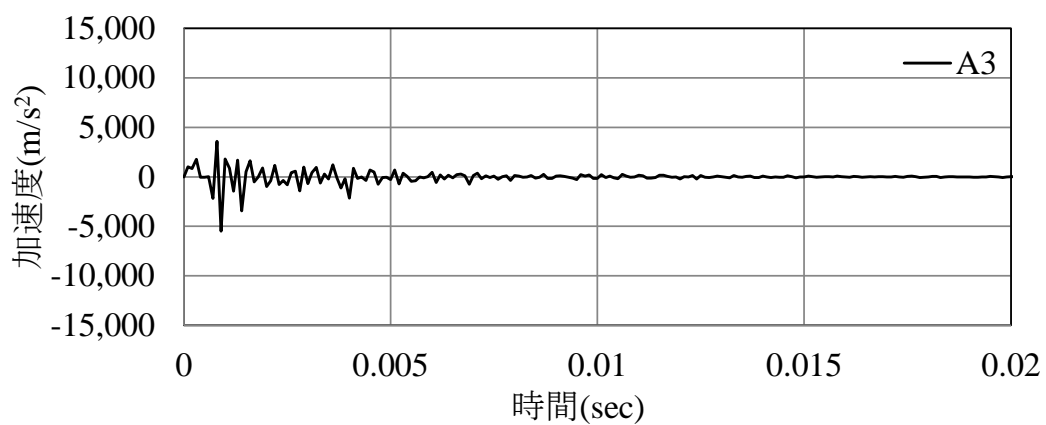
以上に示したとおり、自由面近傍における破壊挙動については、一爆破進行長の範囲で 2 次元的な議論が可能であり、振動伝搬傾向については、孔奥方向への振動が小さくなるという指向性の存在が推測される。



(a) 加速度センサ A1 (側壁部)

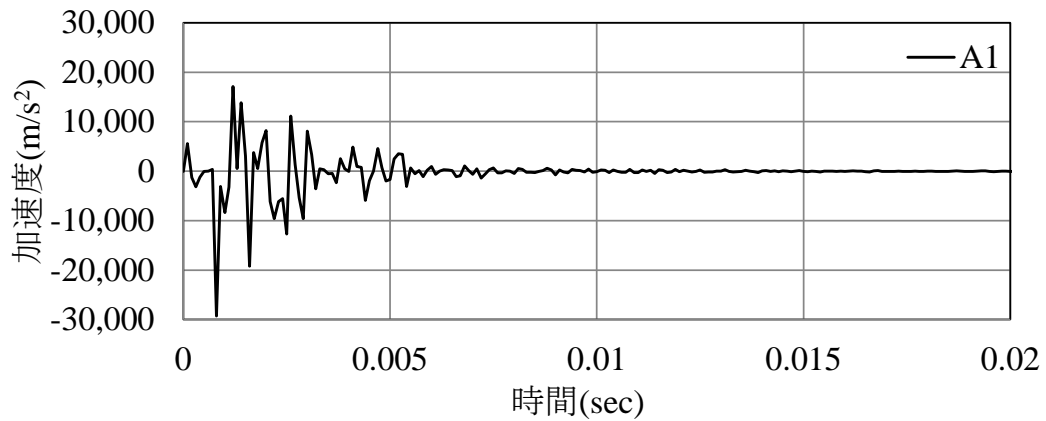


(b) 加速度センサ A2 (天頂部)

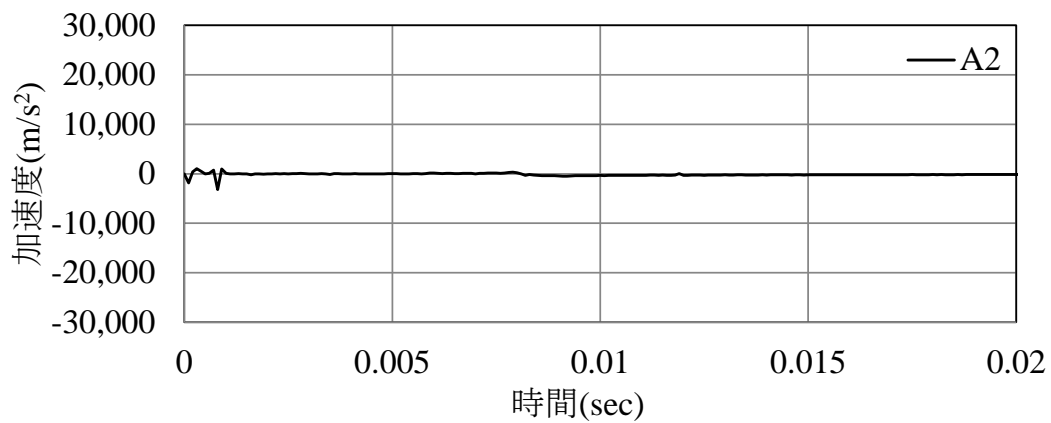


(c) 加速度センサ A3 (前方部)

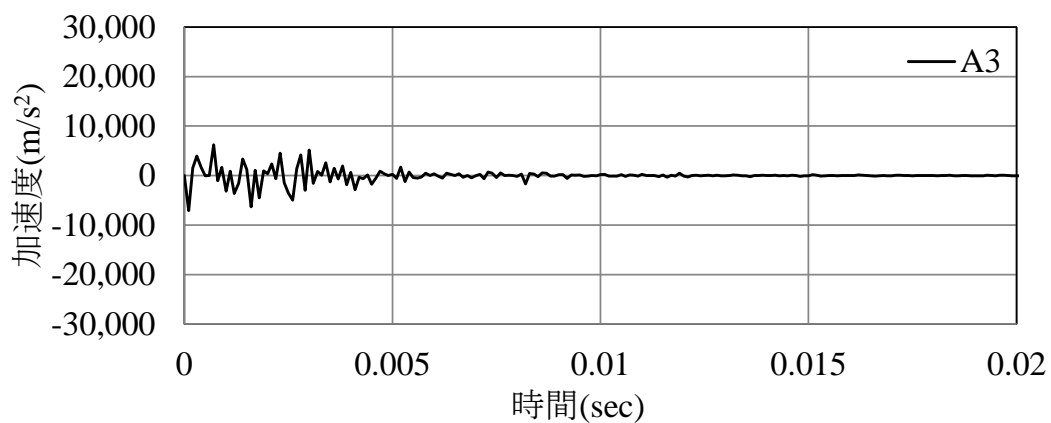
図 5.3 試験体外周面での加速度波形 (No.2 試験体)



(a) 加速度センサ A1 (側壁部)



(b) 加速度センサ A2 (天頂部) (計測不良と判断される)



(c) 加速度センサ A3 (前方部)

図 5.4 試験体外周面での加速度波形 (No.3 試験体)

5.4 ガス圧の同定⁴⁾

前節で示したとおり，当発破実験ではガス圧を直接計測することはできなかった．既往の研究においても，ガス圧を直接的あるいは間接的に計測した事例はほとんど見当たらない．ガス圧は，瞬間的にきわめて大きな圧力が作用するため，これを直接的に実測し難いことが要因の一つと考えられる．とはいえ，数値解析の入力値となるガスの圧力波形を把握することは重要と考える．そこで，発破実験で計測されたデータを用いてガスの圧力波形の同定を試みた．

起爆後に発生した高圧のガスは，瞬間的に発破孔に作用し，これが試験体内を伝搬する応力波に変換され，この結果として試験体外周のセンサで加速度として捉えられている．今回の発破実験では物性値の明確な試験体を用いていることから，加速度時刻歴波形を用いて逆解析によりガスの圧力波形を求めることが可能と考えた．

(1) ガスの圧力波形

ガスの圧力波形は，3.3 で示したように種々提案されているが，指数関数を用いた形状が適用されるケースが多く見受けられる．詳細な解析を進める前に予備解析を行い，圧力波形と発破実験における亀裂伸展挙動との関係を定性的に検討した．その結果，指数関数を用いた圧力波形の場合，圧力がピークに達した後の減少時間をある程度長く設定することで，亀裂進展の再現性が向上する傾向が認められた．さらに，様々な関数により圧力波形について検討したところ，ピーク以降の圧力減少域を上凸な関数で与えることで加速度についてより良好な再現結果が得られることを確認した．

そこで，ガスの圧力波形 $P(t)$ を次式のように設定する (図 5.8)．

$$P(t) = \begin{cases} P_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{t}{a}-1\right)\right) & 0 \leq t \leq a \\ P_0 \cos\left(\frac{\pi}{2b}\left(\frac{t}{a}-1\right)\right) & a \leq t \leq (b+1)a \\ 0 & (b+1)a < t \end{cases} \quad (5.1)$$

$$P(t) = P(t-t_0) \quad (5.2)$$

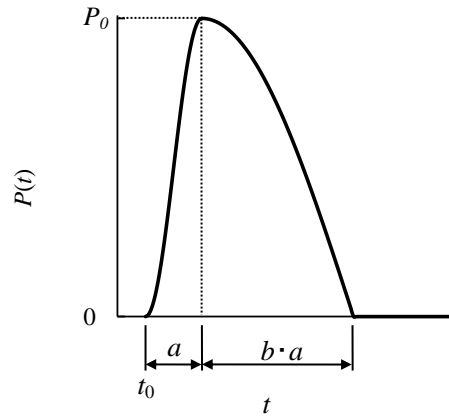


図 5.8 ガスの圧力波形

ここに、 P_0 は最大圧力、 a はガス圧が最大値に達するまでの時間（以下、立ち上がり時間と呼ぶ）、 b はガス圧が最大値からゼロにまで減少する時間を a で除した値、 t_0 は立ち上がり時間のシフト量である。逆解析においては、 P_0 、 a 、 b 、 t_0 を未知変数として設定する。

(2) 同定手順

圧力波形の同定には、1次要素を用いた二次元動弾性時間域境界要素法を用いた逆解析によった。解析モデルを図 5.9 に示す。両サイドの自由面を各 100 要素（要素長 2.5cm）、発破孔を 10 要素で離散化した。

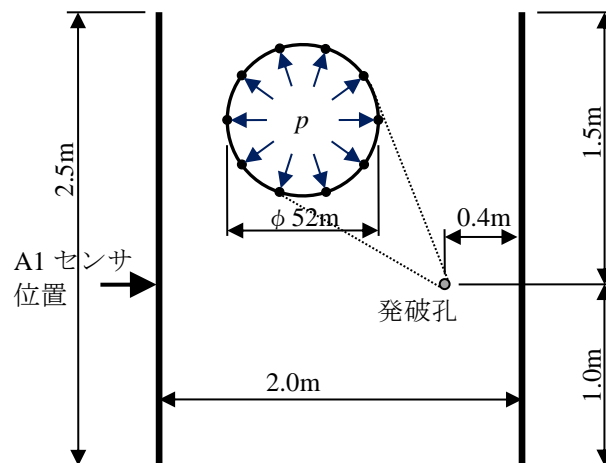


図 5.9 境界要素モデル

まず、仮定した圧力波形に対する応答を境界要素解析により求め、加速度センサと同位置の加速度時刻歴 $A(t)$ を導出する。次に、サンプリング周波数 10kHz で計測された加速度時刻歴データ B_i ($i=1, \dots, 5$) を再現できるよう、下式に示す誤差二乗和を目的関数とし、未知変数 P_0 , a , b , t_0 を推定した。

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 (A(t_i) - B_i)^2 \quad (5.3)$$

ここで、No.2 試験体は“鉄砲”でガス圧が抜けていることから除外し、破壊後の挙動も捉えることができた No.3 試験体の加速度センサ A1 データを使用した。

なお、今回計測された B_i については、第一波目のピークが捉えられていないことから、この間のデータは除外した。また、上面および底面から反射波が到達する時刻以降は評価が困難になる。よって、 B_i として使用したデータは、センサに圧力波が到達してから 5×10^{-4} s 間の 5 データを解析の対象とした。

(3) 同定解析結果

同定解析の結果として、加速度時刻歴波形の実測データと解析結果の比較を図 5.10 に示す。解析結果はおおむね実測データを再現できていることが確認できる。このときの初期時刻 $t_0 = -4.46 \times 10^{-4}$ s, 最大圧力 $P_0 = 5.75 \times 10^8$ Pa, 立ち上がり時間 $a = 1.33 \times 10^{-4}$ s, 圧力減少時間係数 $b = 2.75$ であった。

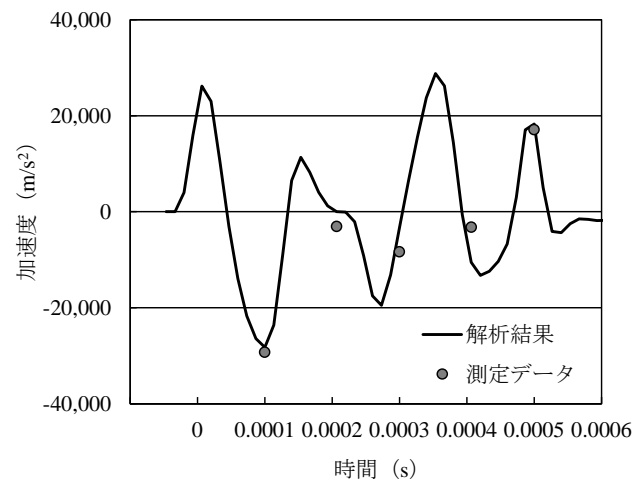


図 5.10 ガス圧同定解析の結果

測定データが少ないため、データ間で補間されている解析波形のピークについては、評価を行うことが困難である。しかしながら、解析結果と実測データはおおむね一致していることが確認できる。また、図 5.10 の初動で明瞭に大きな加速度が現れているが、これは実測では応答周波数に起因して捉えられなかった第一波目のピークを再現している可能性がある。したがって、ここで得たガス圧を、解析的に得られた確からしいガス圧として、以降の再現解析で使用するものとする。

5.5 個別要素解析による再現解析

(1) 再現解析のモデル

個別要素解析は2次元解析とし、解析モデルを図5.11に示す。形状は実験に用いた試験体と同じとし、底面は地盤と接しているためそれと等価な粘性境界として設定した。

解析パラメータを表5.6に示す。密度や引張破壊強度は実測値を用い、バネ定数および粘性係数は式4.5と式4.7により算出した。破壊エネルギー解放率 G_f は、普通コンクリートに対して定められた次式⁵⁾により算出した。

$$G_f = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f'_{ck}{}^{1/3} \quad (5.4)$$

ここに、 d_{\max} は粗骨材の最大寸法(mm)、 f'_{ck} は圧縮強度の特性値(N/mm²)である。試験体で使用したコンクリートの粗骨材寸法 $d_{\max} = 25\text{mm}$ 、 f'_{ck} は実測値 σ_c より 39.6 N/mm^2 を用いて、 $G_f = 99.67\text{ N/m}$ と算出した。

また、コンクリートの粘着力 c は圧縮強度の $1/5 \sim 1/7$ 程度であることから $1/6$ とし、摩擦係数 μ は内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ と仮定して $\mu = \tan \phi$ より算出した。

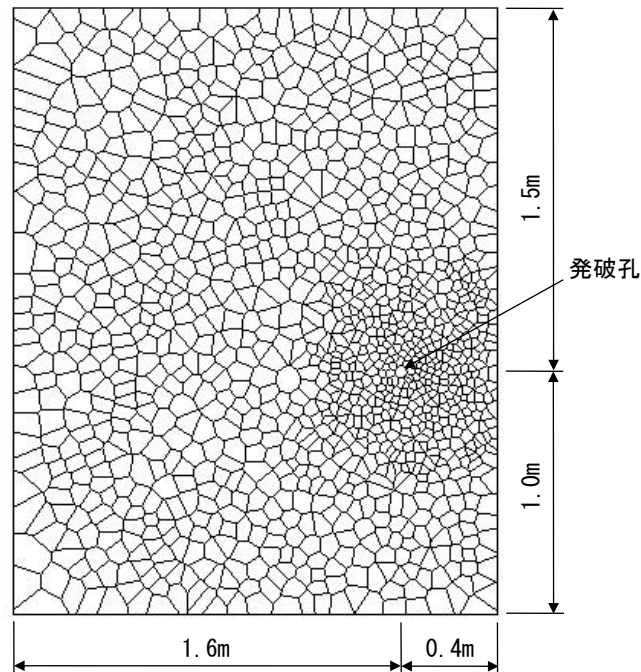


図 5.11 個別要素解析モデル

表5.6 解析パラメータ

法線方向バネ定数		K_n	450,000	MPa / m ²
接線方向バネ定数		K_s	90,000	MPa / m ²
離散化前	法線方向粘性係数	η_n	22.59	MPa・s / m ²
	接線方向粘性係数	η_s	10.10	MPa・s / m ²
離散化後	法線方向粘性係数	η_n	3.08	MPa・s / m
破壊エネルギー開放率		G_f	99.67	N/m
粘着力		C	6.66	MPa
摩擦係数		μ	0.58	—

発破実験では試験体底面は地盤と接しているため、地中への波動伝播を考慮する必要がある。対象地盤を無減衰の一次元半無限地盤で近似すると、作用力とのつり合い式から、地盤の鉛直方向等価剛性 K_s は以下の複素剛性で与えられる。

$$K_s = (\lambda_s + 2\mu_s)i\kappa \quad (5.5)$$

ここに、 λ_s 、 μ_s は地盤のラメ定数、 $i = \sqrt{-1}$ 、 κ は波数である。式(5.4)より、 K_s に対応するダッシュポットの単位長さ当りの粘性係数 η_s (インピーダンス) を次式で与えた。

$$\eta_s = \sqrt{(\lambda_s + 2\mu_s)\rho_s} \quad (5.6)$$

ここに、 ρ_s は地盤の密度である。地盤のパラメータを $\rho_s = 1,800\text{kg/m}^3$ 、弾性係数 $E = 28\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ と仮定し、式(5.6)より $\eta_s = 278\text{ kPa・s/m}^2$ と設定した。

また、解析上の時間増分 Δt は $1.0 \times 10^{-8}\text{ s}$ とした。

(2) 再現解析の結果

再現解析の結果として、試験体の破壊状況と試験体側面における振動について考察する。なお、当該解析結果は、a) CFL 条件を十分に満足している、b) 粘性係数により解の安定化を図っている、c) 破壊片の飛散等の挙動は物理的に自然である、d) 振動波形の不安定性

は見られない（不安定なら振動は指数関数的に発散するはずである）ことから、解の安定性は確保されていると判断できる。

1) 破壊状況⁴⁾

再現解析の結果として、発破直後から $t = 0.02$ s 時点までの破壊進展状況を図 5.12 に示す。発破孔を中心として右斜め上、右斜め下、鉛直上向きおよび左斜め下方向に方向性をもった亀裂が放射状に発達し、飛散する様子が再現されており、写真 5.6～5.8 に示された時系列の破壊進展過程や亀裂発生の特徴とよく一致している。



(a) $t=0.0025$ s



(b) $t=0.0050$ s



(c) $t=0.0075$ s



(d) $t=0.0100$ s

図 5.12(1) 再現解析結果 case.1

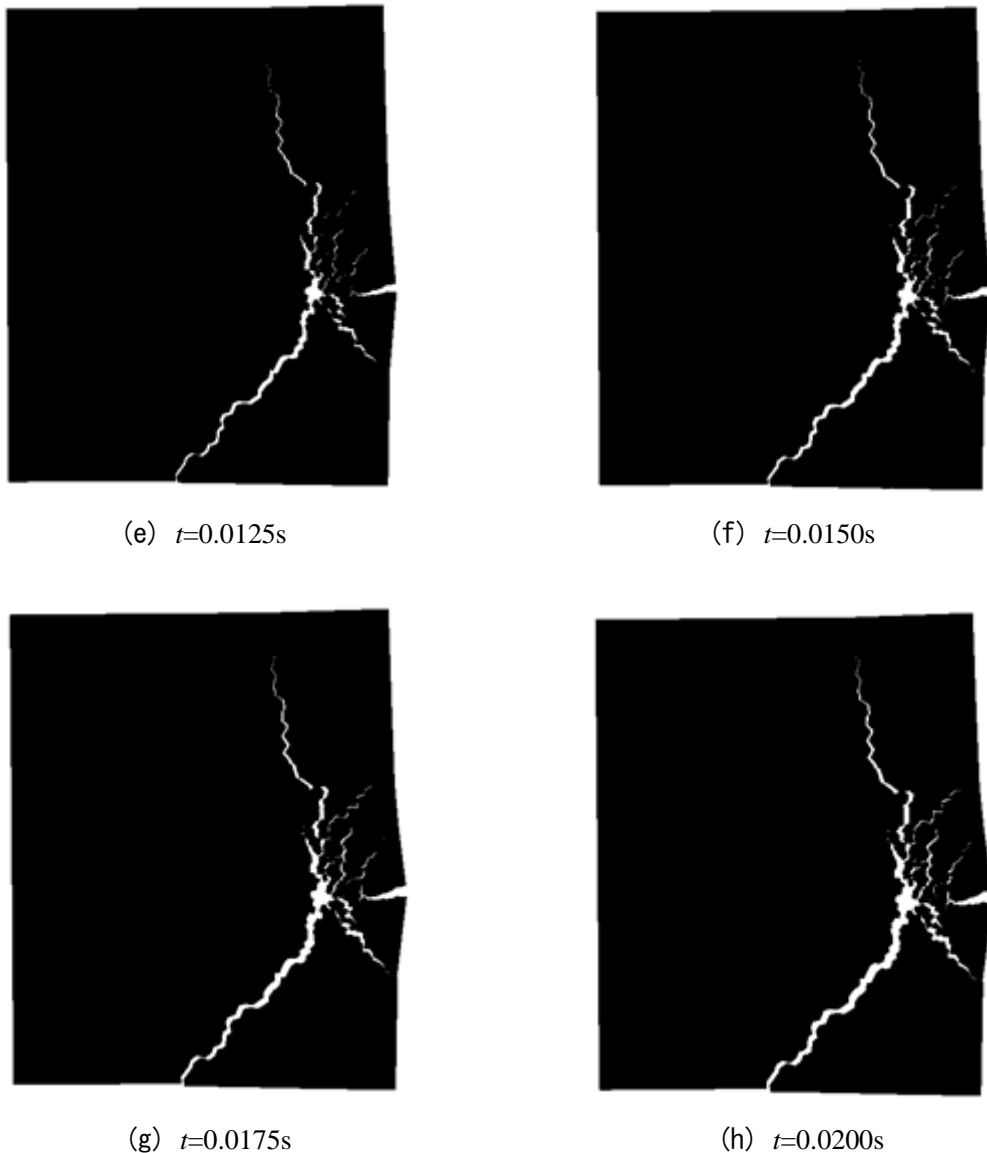
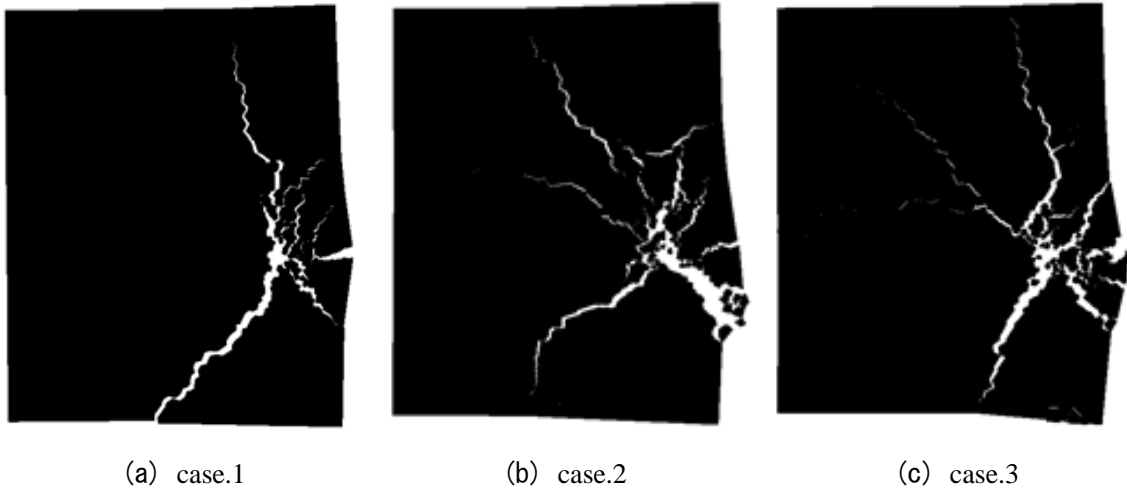


図 5.12(2) 再現解析結果 case.1

ただし、このような破壊状況は個別要素メッシュの違いに影響を受けることが考えられる。ボロノイ分割では、乱数によりメッシュ生成しており、亀裂は要素境界の破壊により表現されるので、亀裂分布はメッシュ毎に異なる。このため、複数メッシュで解析を行い、要素分割の違いによる亀裂分布への影響を確認した（図 5.13）。その結果、当然ながら要素分割に起因するバラツキは存在するものの、主要な亀裂の進展方向など本質的な違いは認められなかった。

図 5.13 再現解析におけるメッシュの影響 ($t=0.0200s$)

なお、複数回の解析のなかで、例えば図 5.13(c)のように、No.1 試験体と同様に左水平方向に幅の小さな亀裂が発生したケースがある。左水平方向の領域も亀裂が発生しやすい応力状態にあるものの、亀裂が卓越するほどではなく、要素分割や発破条件の違いに左右されて、亀裂が発生したり発生しなかったりしているものと考えられる。発破実験においても、コンクリートは厳密には均一でなく、発破条件も異なることを考慮すると、上述の亀裂はこれらの不確実性のもとで発生し得る範囲のバラツキと考えられる。したがって、解析結果の水平方向亀裂は、メッシュの影響というより、発破実験と同程度のバラツキを示していると解釈できる。

また、再現解析結果における左斜め下方向の亀裂は、写真 5.7~5.8 に示された実験結果より大きな亀裂として発生している。これは、試験体底面に設定した粘性境界が十分に再現されていないために発生している可能性が考えられる。

2) 振動の発生傾向

加速度の再現解析結果として、試験体側部の A1 センサと同位置における個別要素解析の加速度時刻暦と、ガス圧の同定解析で求めた加速度波形との比較を図 5.14 に示す。

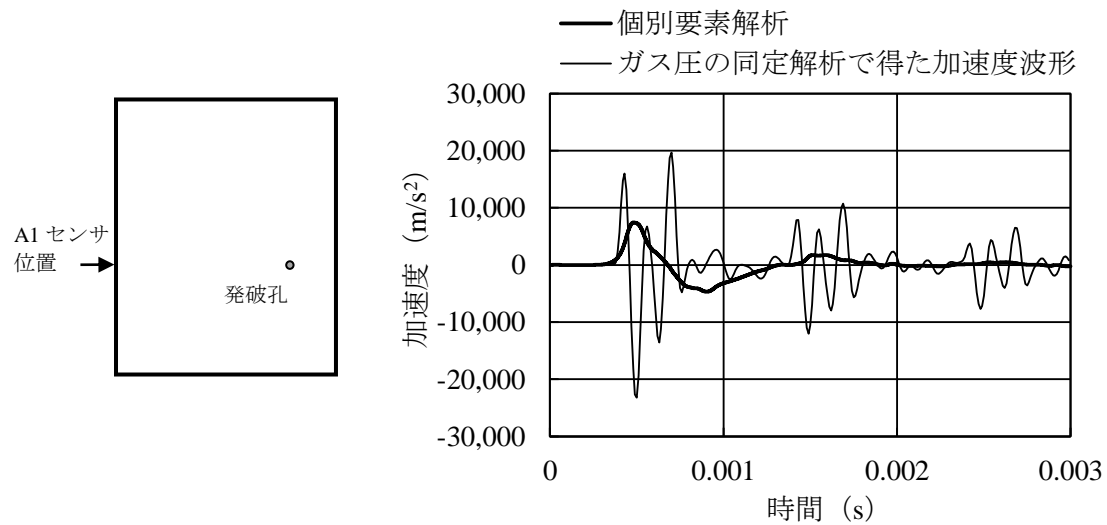


図 5.14 加速度の再現結果（側壁部）

ここで、個別要素解析では、着目した個別要素が周りの要素からの影響で微振動して高周波成分を含んでいるため、10kHz のローパスフィルタにより高周波成分をカットしている。使用したローパスフィルタは、National Instruments 社 LabVIEW に実装されているバターワースフィルタである。また、実測の加速度データはサンプリング周期がやや粗いため、“5.4 ガス圧の同定”で得られた加速度波形を用い、個別要素解析との整合性のため、同じローパスフィルタを使用した。

境界要素法では破壊による形状変化の影響を考慮できていないことから、両者の単純な比較はできないが、ピークのタイミングはおおむね一致しており、定性的な傾向はおおよそ再現できている。ただし、振幅の大きさは個別要素解析結果の方が小さく、とくに、第二波目以降はピークも明瞭ではない。比較対象の境界要素法では自由面側の破壊や減衰の影響を考慮していないため、個別要素解析結果より大きくなっていると考えられる。

また、同定解析で得られた加速度波形に見られるような振動成分は表現できていない。これは、ローパスフィルタの影響もあると考えられるが、個別要素解析では高周波領域における動的挙動の再現性があまり高くないためと考えられる。ただし、このような高周波の振動成分（おおよそ 8kHz）は、発破振動における主要周波数帯（数百 Hz 以下）より高周波域であり、地盤振動に及ぼす影響の議論ではあまり問題にならないと考える。

なお、頂部 A2 センサと同位置については、個別要素解析の結果と、No.2 試験体の実

測データを用いて得た加速度波形との一致は見られなかった。これは、①個別要素解析の結果、図 5.12 に示されるように頂部は破壊領域に入っており、加速度波形が大きく乱れている、②頂部の加速度波形を計測できた No.2 試験体は“鉄砲”により破壊していないことから、両者を比較することができないためである。このため、頂部についての議論は省略する。

以上の結果より、当該解析手法は発破実験で得られた実挙動をおおむね再現していると判断できる。

5.6 第5章のまとめ

これまで十分に把握されていなかった自由面発破における破壊挙動および波動伝搬傾向を明らかにするため、コンクリート試験体を用いて、デカップリング係数の大きな制御発破を想定した発破実験を実施した。さらに、および個別要素解析を用いた解析手法の妥当性を確認するため再現解析を実施した。この結果、これまで知られていなかった自由面発破の実挙動を明らかにすることができた。得られた知見を以下にまとめる。

- a) コンクリート試験体を用いた発破実験より、自由面近傍における破壊挙動については、一爆破進行長の範囲で2次元的な議論が可能であり、振動伝搬傾向については、孔奥方向への振動が小さくなるという指向性の存在が推測された。
- b) 自由面発破における破壊および振動伝搬の挙動は厳密には3次元であるが、3次元の挙動との差異を念頭におけば、自由面発破の数値解析的検討に2次元解析を適用することは可能である。
- c) 個別要素法を用いた再現解析では、ガス圧や解析パラメータを適切に設定することにより、発破実験により得られた破壊や振動の挙動をおおむね再現することができた。また、解析手法の妥当性を確認することができた。

以上の結果より、岩盤を対象とした場合であっても、解析パラメータを適切に設定することで、自由面発破における破壊と振動の挙動を定性的かつある程度定量的に評価することが可能となり、振動低減効果の検討を合理的に行うことができる。

第5章の参考文献

- 1) 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, Vol.71, No.3, pp.1-10, 2015. (掲載予定)
- 2) 土木学会: 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集, pp.124-131, 2004.
- 3) 株式会社ジャペックス技術資料
- 4) 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.
- 5) 土木学会 コンクリート委員会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.37-38, 2013.

第6章

遠方場における放射波動の伝搬特性

6.1 概要

第5章では、自由面発破における発破孔近傍の破壊挙動と振動伝搬傾向を明らかにするとともに、解析手法の検証を行った。ここで行った発破実験では、発破孔外周に放射される波動に指向性があることを推測させる結果が得られた。このような事象については、既往の研究等で確認や議論されたことはない。しかしながら、自由面を設けることによって波動伝搬に指向性が生まれるのであれば、自由面を設置する方向によって効果的に振動低減が図れることを示唆しており、効果的な自由面形成パターンの決定にあたって有益な知見になり得る。

ただし、これまでは自由面発破の実験結果にもとづいて発破孔近傍での議論を行っていたが、発破振動が問題となる遠方に対する影響を議論する場合、放射された波動エネルギーが地山内でどのような伝搬特性を示すか調べる必要があると考える。

本章では、弾性波動解析において従来から用いられている波動の遠方場近似¹⁾の考え方を適用し、上記のような波動伝搬特性についての考察を進める。まず第4章の解析手法を用いて、発破孔から地山内に放射される放射波動エネルギーを算出する。次に、この放射波動が地山内においてどのような伝搬特性を示すかを調べるために遠方場近似を適用し、放射波動の指向性について考察する。

本章では、前章のコンクリート試験体に代わって、より現実的な検討として岩盤地山を想定してモデル化する。なお、地山は通常、複雑な地質構造を有しており、これによっても波動の伝搬傾向は影響を受けるが、ここでは放射される波動場の評価を目的とし、議論を容易にするため、破碎帯、層理面あるいは地表面からの反射波の影響などは考慮せず、半無限一様な地山を想定する。

6.2 放射波動の遠方場近似

自由面発破の実験結果より、発破孔の近傍において、振動はおおむね2次元的に伝搬することが推測された。発破孔は細長い円筒形であり奥行き方向への波動の放射が少ないためと考えられる。ただし、発破振動の影響が問題となるのは、通常は発破孔から離れた個所であり、放射波動について遠方場で評価する必要がある。そこで、弾性波動解析において従来から用いられている放射波動の遠方場近似^{2),3)}を適用することとする。

なお、遠方場から見た場合、発破孔はほとんど“点”としてしか見なせない存在であるため、波動伝搬の遠方場近似は3次元で近似する必要がある。ここでは、3次元動弾性問題の遠方放射波動場の近似評価について概略を記述する。

ある閉境界 Γ から放射される波動場は、次の積分方程式で表現することができる。

$$u_j = \int_{\Gamma} u_{jk}^* p_k d\Gamma - \int_{\Gamma} p_{jk}^* u_k d\Gamma \quad (6.1)$$

ここに、 \mathbf{x} は無限領域内の点、 $\hat{\mathbf{x}}$ は単位ベクトル、 \mathbf{y} は Γ 上の点、 u_j は無限領域内の点 \mathbf{x} における変位、 u_k 、 p_k は Γ 上における変位と表面力、 u_{jk}^* 、 p_{jk}^* は周波数空間における変位と表面力の基本解である（図 6.1）。

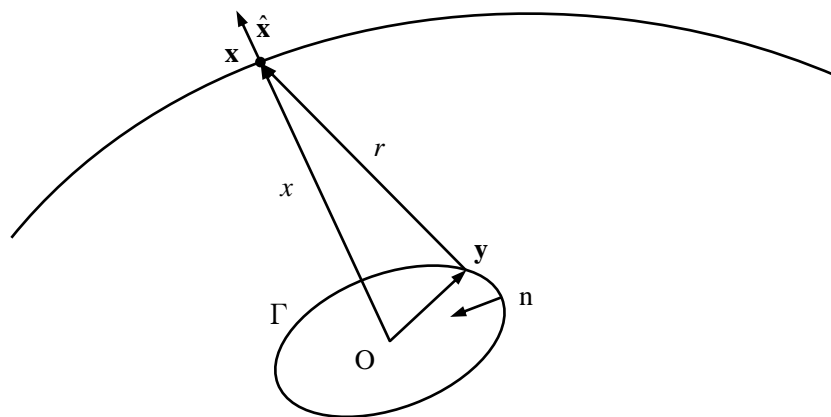


図 6.1 積分境界と遠方場

基本解 u_{jk}^* 、 p_{jk}^* は次式により与えられる。

$$u_{jk}^* = \frac{1}{4\pi\mu} (\hat{U}_1 \delta_{jk} - \hat{U}_2 r_{,j} r_{,k}) \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} p_{jk}^* = \frac{i}{4\pi} & \left[\left\{ (\delta_{jk} r_{,n} + n_k r_{,j}) + \frac{\lambda}{\mu} n_j r_{,k} \right\} \frac{\partial \hat{U}_1}{\partial r} \right. \\ & - \left\{ (\delta_{jk} r_{,n} + n_k r_{,j}) + 2(n_j r_{,k} - 2r_{,j} r_{,k} r_{,n}) + 2\frac{\lambda}{\mu} n_j r_{,k} \right\} \frac{\hat{U}_2}{r} \\ & \left. - (2r_{,j} r_{,k} r_{,n} + \frac{\lambda}{\mu} n_j r_{,k}) \frac{\partial \hat{U}_2}{\partial r} \right] \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 &= \left\{ 1 + \frac{i}{k_T r} - \frac{1}{(k_T r)^2} \right\} \frac{e^{ik_T r}}{r} - \kappa^2 \left\{ \frac{i}{k_L r} - \frac{1}{(k_L r)^2} \right\} \frac{e^{ik_L r}}{r} \\ \hat{U}_2 &= \left\{ 1 + \frac{3i}{k_T r} - \frac{3}{(k_T r)^2} \right\} \frac{e^{ik_T r}}{r} - \kappa^2 \left\{ 1 + \frac{3i}{k_L r} - \frac{3}{(k_L r)^2} \right\} \frac{e^{ik_L r}}{r} \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\kappa^2 = (k_L / k_T)^2 = \mu / (\lambda + 2\mu) \quad (6.5)$$

ここに、 k_L , k_T は縦波と横波に対する波数、 \mathbf{n} は Γ 上の単位外向き法線ベクトル、 λ , μ は Lamé 定数である。

原点 \mathbf{O} からソース点 \mathbf{x} までの距離 x が、 \mathbf{O} から積分点 \mathbf{y} までの距離 y に比べて十分に大きいものとして、以下の近似を式(6.2)に適用する。

$$r = x - \hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{y} = x - a_y \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} &\cong \frac{1}{x} \\ e^{ikr} &\cong e^{ik(x-a_y)} \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{U}_1}{\partial r} &\cong \frac{ik_T}{x} e^{ik_T(x-a_y)} \\ \frac{\partial \hat{U}_2}{\partial r} &\cong \frac{ik_T}{x} e^{ik_T(x-a_y)} - \frac{\kappa^2 ik_L}{x} e^{ik_L(x-a_y)} \end{aligned} \quad (6.8)$$

さらに、次式を適用する。

$$\frac{\lambda}{\mu} \kappa^2 = 1 - 2\kappa^2 \quad (6.9)$$

これにより，基本解 u_{jk}^* , p_{jk}^* は次式により近似される．

$$\begin{aligned} u_{jk}^* &\cong A_{jk}^T \frac{1}{x} e^{ik_T(x-a_y)} + A_{jk}^L \frac{1}{x} e^{ik_L(x-a_y)} \\ p_{jk}^* &\cong -B_{jkl}^T n_l \frac{1}{x} e^{ik_T(x-a_y)} + B_{jkl}^L n_l \frac{1}{x} e^{-ik_L(x-a_y)} \end{aligned} \quad (6.10)$$

ここで， A^T , A^L , B^T , B^L は次式で定義される．

$$\begin{aligned} A_{jk}^T &= \frac{1}{4\pi\mu} (\delta_{jk} - \hat{x}_j \hat{x}_k) \\ A_{jk}^L &= \frac{\kappa^2}{4\pi\mu} \hat{x}_j \hat{x}_k \\ B_{jkl}^T &= \frac{ik_T}{4\pi} (\delta_{jk} \hat{x}_l + \delta_{jl} \hat{x}_k - 2\hat{x}_j \hat{x}_k \hat{x}_l) \\ B_{jkl}^L &= \frac{ik_L}{4\pi} \{2\kappa^2 \hat{x}_k \hat{x}_l + (1 - 2\kappa^2) \delta_{kl}\} \hat{x}_j \end{aligned} \quad (6.11)$$

式(6.10)を式(6.1)に適用すると変位 u_j の遠方場近似は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} u_j &= \int_{\Gamma} u_{jk}^* p_k d\Gamma - \int_{\Gamma} p_{jk}^* u_k d\Gamma \cong u_j^T + u_j^L \\ u_j^T &= \Omega_j^T \frac{1}{x} e^{ik_T x}, \quad u_j^L = \Omega_j^L \frac{1}{x} e^{ik_L x} \end{aligned} \quad (6.12)$$

ここに，右辺の各項 u_j^T , u_j^L はそれぞれ横波と縦波成分を与える．なお， Ω_j^T , Ω_j^L は次式で定義される．

$$\begin{aligned} \Omega_j^T &= A_{jk}^T \int_{\Gamma} e^{-ik_T a_y} p_k d\Gamma + B_{jkl}^T \int_{\Gamma} n_l e^{-ik_T a_y} u_k d\Gamma \\ \Omega_j^L &= A_{jk}^L \int_{\Gamma} e^{-ik_L a_y} p_k d\Gamma + B_{jkl}^L \int_{\Gamma} n_l e^{-ik_L a_y} u_k d\Gamma \end{aligned} \quad (6.13)$$

また， u_j に対応する半径 x の円形境界上における表面力成分 p_j の遠方場近似は次式で与えられる．

$$p_j = \lambda \hat{x}_j u_{k,k} + \mu \hat{x}_k (u_{k,j} + u_{j,k}) \quad (6.14)$$

ここで,

$$u_{k,k} = ik_T u_k^T \hat{x}_k + ik_L u_k^L \hat{x}_k \quad (6.15)$$

より, 以下のとおりとなる.

$$\begin{aligned} A_{jk}^T \hat{x}_j &= \frac{1}{\mu} (\hat{x}_k - \hat{x}_k) = 0 \\ B_{jkl}^T \hat{x}_j &= ik_T (\hat{x}_k \hat{x}_l + \hat{x}_k \hat{x}_l - 2\hat{x}_k \hat{x}_l) = 0 \\ \Omega_j^T \hat{x}_j &= 0 \\ u_j^T \hat{x}_j &= 0 \end{aligned} \quad (6.16)$$

したがって, 式(6.14)に式(6.15)を適用すると, p_j の横波および縦波成分はそれぞれ次式のように分離できる.

$$p_j = p_j^T + p_j^L = ik_T \mu u_j^T + ik_L \{ (\lambda + \mu) \hat{x}_j \hat{x}_k u_k^L + \mu u_j^L \} \quad (6.17)$$

また, 式(6.11)より次の関係が成り立つ.

$$A_{jk}^T A_{jl}^L = 0, \quad A_{jk}^T B_{jmn}^L = 0, \quad B_{jkl}^T B_{jmn}^L = 0, \quad A_{jk}^L B_{jmn}^T = 0 \quad (6.18)$$

したがって, $\Omega_j^T \Omega_j^L = 0$ より, $u_j^T \perp u_j^L$ であり $u_j^T \perp \hat{x}_j$ となる. 以上より, $p_j \bar{u}_j$ は次式で与えられる. なお, \bar{u}_j^T, p_j^T は放射方向 x に直交し, \bar{u}_j^L, p_j^L は x 方向に平行な成分を与える.

$$\begin{aligned} p_j \bar{u}_j &= (p_j^T + p_j^L)(\bar{u}_j^T + \bar{u}_j^L) = p_j^T \bar{u}_j^T + p_j^L \bar{u}_j^L \\ &= \frac{1}{x^2} ik_T \mu \Omega_j^T \bar{\Omega}_j^T + \frac{1}{x^2} ik_L \{ (\lambda + \mu) \hat{x}_j \hat{x}_k \Omega_k^L + \mu \Omega_j^L \} \bar{\Omega}_j^L \end{aligned} \quad (6.19)$$

なお、 Ω_j の計算の際には Γ 上の積分が必要となる．ここで、 Γ が長さ $2l$ の円筒で与えられ、 u_j, p_j が Γ の長手方向 (y_2) に一定と仮定する (図 6.2～6.3)．

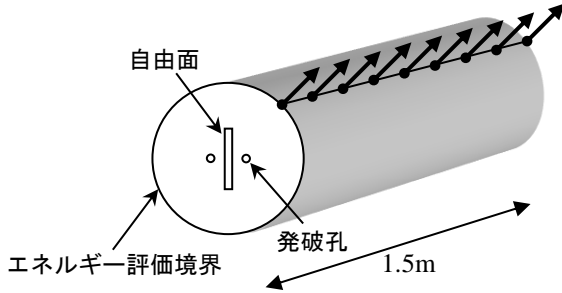


図 6.2 エネルギー評価境界の
奥行き方向の仮定

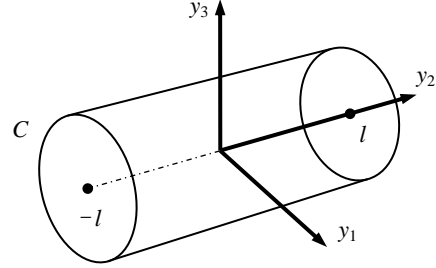


図 6.3 境界上の積分領域

このとき、 Γ 上の積分は次式のように分離できる．

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} e^{-ik_T a_y} p_j d\Gamma &= \int_C p_j e^{-ik(\hat{x}_\alpha y_\alpha)} dC \int_{-l}^l e^{-ik\hat{x}_2 y_2} dy_2 \\ \int_{\Gamma} n_l e^{-ik_T a_y} u_j d\Gamma &= \int_C n_l u_j e^{-ik(\hat{x}_\alpha y_\alpha)} dC \int_{-l}^l e^{-ik\hat{x}_2 y_2} dy_2 \\ \hat{x}_\alpha y_\alpha &= \hat{x}_1 y_1 + \hat{x}_3 y_3 \end{aligned} \quad (6.20)$$

上式において、 y_2 に関する積分は次式のように評価できる．

$$I = \int_{-l}^l e^{-ik\hat{x}_2 y_2} dy_2 = \begin{cases} \frac{2}{k\hat{x}_2} \sin k\hat{x}_2 l & (k\hat{x}_2 \neq 0) \\ 2l & (k\hat{x}_2 = 0) \end{cases} \quad (6.21)$$

よって、式(6.13)の Ω_j は、円筒断面 C の周積分として次式で与えられる．

$$\Omega_j = I \left\{ A_{jl} \int_C p_l e^{-ik(\hat{x}_\alpha y_\alpha)} dC + B_{jlm} \int_C u_l n_m e^{-ik(\hat{x}_\alpha y_\alpha)} dC \right\} \quad (6.22)$$

また, 半径 x の円形境界上における単位立体角あたりの平均パワー $P_s(\omega)$ は次式により与えられる.

$$\begin{aligned} P_s(\omega) &= \langle p_j \dot{u}_j \rangle = \langle \operatorname{Re}(p_j(\mathbf{x}, t)) \operatorname{Re}(\dot{u}_j(\mathbf{x}, t)) \rangle \\ &= -\frac{\omega}{2} \operatorname{Im}(p_j(\mathbf{x}, \omega) \bar{u}_j(\mathbf{x}, \omega)) \end{aligned} \quad (6.23)$$

ここで, ω は円振動数, $\langle \cdot \rangle$ は時間平均, \dot{u} は変位速度, \bar{u}_j は u_j の複素共役, $\operatorname{Im}()$ は $()$ 内の虚部である. 単位立体角あたりの平均パワーは次式で与えられる (図 6.4).

$$P_{\theta\varphi}(\omega) = x^2 P_s(\omega) \quad (6.24)$$

式(6.19)より, $p_j \bar{u}_j$ は $1/x^2$ に比例する. したがって, $P_{\theta\varphi}$ は $1/x^2$ を含まず, x の項は $e^{ik(x-a_y)}$ にのみ比例することになるが, $p_j \bar{u}_j$ においては,

$$e^{ikx} e^{-ikx} = 1 \quad (6.25)$$

となるので, $P_{\theta\varphi}$ は x に全く依存しない.

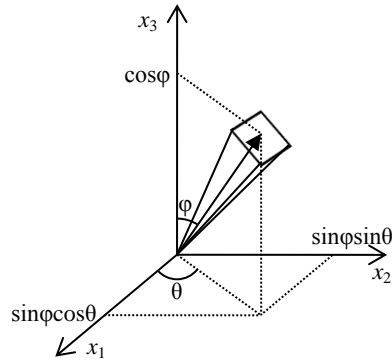


図 6.4 単位立体角あたりの平均パワー

6.3 個別要素解析結果に対する遠方場近似の適用

遠方場における波動伝搬特性について検討するにあたっては、6.2 に示したとおり、閉境界 Γ 上の表面力 p および変位 u が必要となる。本研究では、個別要素解析で得られた発破孔近傍の波動場に対して遠方場近似を適用する。

まず、発破孔近傍の波動場を求めるための個別要素解析を実施する。解析モデルのイメージを図 6.5 に示す。発破孔近傍の波動場を求めるためのエネルギー評価境界を発破孔の外周に仮定し、半断面（ 180° 範囲）を 20 等分して、表面力および速度を算定する節点を境界上に設定する。このときのエネルギー評価境界は、発破に伴って発生する破壊領域から十分離れた外周側に設定する。

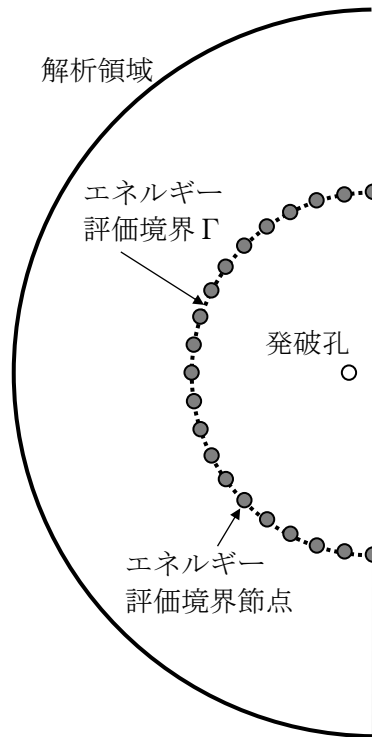


図 6.5 解析モデルとエネルギー評価境界

個別要素解析の結果、エネルギー評価境界と交差する個別要素における表面力および速度の時刻歴を算出する。次に、この表面力および速度を周波数領域に変換するため、下式のように Fourier 変換する。

$$F(\omega) = \int f(t) e^{i\omega t} dt \quad (6.26)$$

ここで, 積分領域は $10^8 < t < 0.01$ (s), $10 < \omega < 2\pi \times 1000$ (rad/s) とする. さらに, 速度 v を次式により変位 u へと変換する.

$$\begin{aligned} u(t) &= e^{-i\omega t} U(\omega) \\ \dot{u}(t) &= -i\omega e^{-i\omega t} U(\omega) = e^{-i\omega t} V(\omega) \\ U(\omega) &= -\frac{V(\omega)}{i\omega} \end{aligned} \quad (6.27)$$

最後に, 以上で算出された周波数領域の表面力 p および変位 u を用いて, 放射波動の遠方場近似を算出する. 個別要素解析の結果に対して遠方場近似を適用する際のフローを図 6.6 に示す.

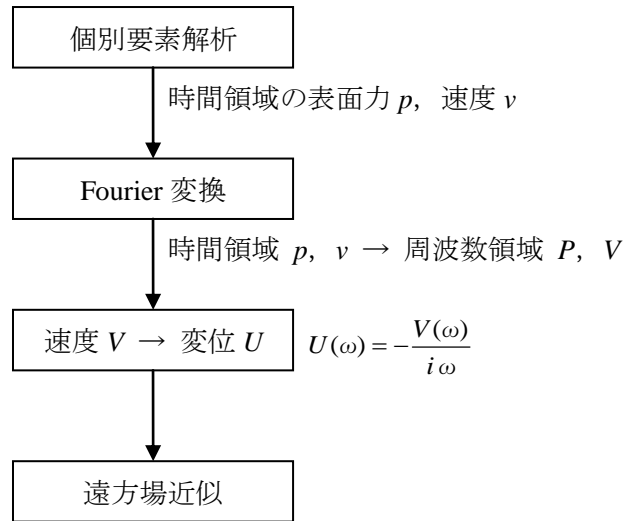


図 6.6 遠方場近似の算出フロー

6.4 自由面発破における波動の遠方場特性

自由面発破における波動の遠方場特性を把握するため、ここでは、実際の岩盤地山を想定した個別要素解析および遠方場近似を行なった。

(1) 解析モデル

解析モデルを図 6.7 に示す。発破孔の位置は、発破実験と同じとなるよう最小抵抗線長 $d=40\text{cm}$ に設定した。また、自由面の長さは、拘束の影響を受けないように $L=3.0\text{m}$ と長めに設定した。

解析時間を短縮するため、解析領域の形状は半径 6m の半円形とし、エネルギー評価境界は半径 3m とした。エネルギー評価境界上で表面力および速度を算定する節点は、半断面（ 180° ）を 20 分割して設定した。

自由面側の境界では、水平変位および回転を拘束する境界条件を設定し、外周の境界は、無減衰の半無限地盤との境界となることから粘性境界として処理し、粘性定数は $\eta = \sqrt{(\lambda + 2\mu)\rho} = 1.25 \times 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{m/s}$ と設定した。

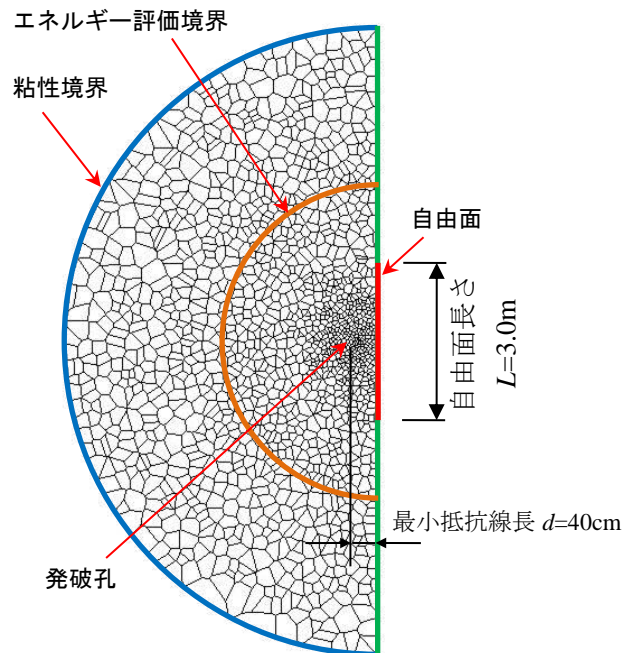


図 6.7 解析モデルとエネルギー評価境界

地山の物性値は、中硬岩地山を想定して表 6.1 のとおりとした。なお、粘性係数（離散化前および離散化後ともに）については、第 5 章のような実測値をふまえた設定ができないため、ここではコンクリートと岩盤とではそれほど変わらないものと仮定し、表 5.6 の値を用いた。

表6.1 解析パラメータ

密 度		ρ	2,600	kg/m^3
ポアソン比		ν	0.25	—
せん断弾性係数		G	20	GPa
引張強度		σ_t	8.0	MPa
法線方向バネ定数		K_n	8.0×10^5	MPa / m^2
接線方向バネ定数		K_s	4.0×10^5	MPa / m^2
離散化前	法線方向粘性係数	η_n	22.59	$\text{MPa} \cdot \text{s} / \text{m}^2$
	接線方向粘性係数	η_s	10.10	$\text{MPa} \cdot \text{s} / \text{m}^2$
離散化後	法線方向粘性係数	η_n	3.08	$\text{MPa} \cdot \text{s} / \text{m}$
破壊エネルギー開放率		G_f	270	N/m
粘着力		c	6.66	MPa
摩擦係数		μ	0.58	—

また、発破孔に作用させるガスの圧力波形は、5.4 の結果より、立ち上がり時間 $a = 1.33 \times 10^{-4} \text{s}$ 、圧力減少時間係数 $b = 2.75$ とし、最大圧力 P_0 については爆薬量を 200g として表 4.3 より $P_0 = 1.958 \times 10^9 \text{Pa}$ とした。

(2) 放射波動の遠方場特性

以上より算出された単位立体角あたりの放射平均パワーを図 6.8 に示す。ここで、赤のプロットは縦波成分（以下、P 波）を、青のプロットは横波成分（以下、S 波）を、緑のプロットは P 波と S 波の合成を示す。

通常、発破振動では 100～200Hz 以下程度の低い周波数帯が問題となること、そして個別要素解析では高周波成分の解析精度が高くないと考えられることから、ここでは 200Hz

における放射平均パワーの特性について考察する．また，縦断方向の波動場についても示しているが，エネルギー評価境界 Γ の長手方向で放射波動を一定と仮定していることから，ここではあくまでも参考として扱い，とくに考察は行なわないものとする．

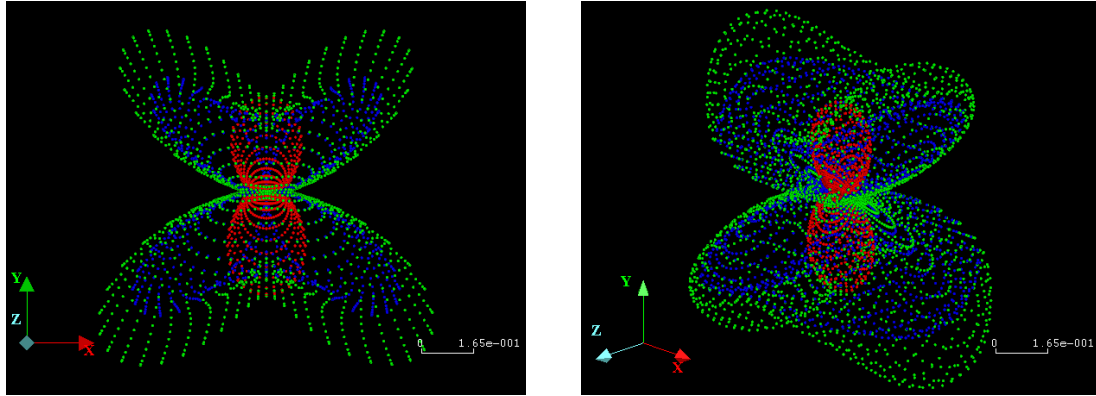


図 6.8 単位立体角あたりの放射平均パワー (200Hz)

自由面が無い場合，P 波が主体となる放射波動が同心円状に拡がると考えられるが，ここでは，P 波の放射平均パワーは自由面と平行方向（図では上下方向）に卓越しており，細長い瓢箪状の特長的な波動場を示している．ここで，発破孔から P 波が放射されるイメージを図 6.9 に示す．放射される波動はまず同心円状に拡がろうとするものの，発破後の早期に自由面側で破壊領域が形成されて反力体が無い状態となるため，自由面と鉛直方向（図 6.9 の水平方向）の変位と表面力が小さくなり，その結果として波動伝搬が抑制されているものと考えられる．自由面と平行方向（図 6.9 の鉛直方向）については，自由面が無い場合と同様に波動場が形成され则认为られる．このように，P 波は自由面と鉛直方向に小さく，平行方向に大きくなるように波動場が形成されるため，結果として自由面と平行方向にピークを示す細長い形状の波動場が形成されるものと推測される．

一方，S 波の放射平均パワーは，自由面に対しおおよそ 45° 方向に卓越しており，バタフライ形状の波動場を示している．発破孔から放射された波動は，当初は P 波であり，これが自由面に対して鉛直に入射した場合は P 波のまま全反射する．これが自由面に対して斜めに角度をもって入射した場合，一般に，P 波は入射角 θ_i と等しい反射角 θ_r で反射すると同時に，S 波の反射波（PS 変換波）を生成する⁴⁾．一般に，反射面における P 波の入射角と反射波との間には，スネルの法則が成立するため，S 波の反射角 ϕ は，次式の関係より，

$$\frac{\sin \theta_i}{V_p} = \frac{\sin \phi}{V_s} \quad (6.28)$$

$\sin \phi = (V_s/V_p) \sin \theta_i$ となり、一般に $V_s < V_p$ であることから、 $\phi < \theta_i$ となる。また、S波はP波と比較して媒体内での減衰が小さいため、遠方に対してより強いエネルギーを保持して伝搬することができる。これらのことから、自由面と鉛直方向および平行方向にはS波はほとんど発生せず、 $\phi < \theta_i$ なる角度の遠方場においてS波の卓越した波動場が形成されるものと推測される。なお、このS波が指向性を持って卓越することについては6.5および6.6で詳細に検証する。

緑プロットで示されるP波とS波の合成は、両者の特徴を合わせた形状の波動場となっている。自由面と鉛直方向には顕著な波動場は形成されず、自由面と平行方向ではP波が卓越し、S波の反射角 ϕ 方向ではS波が卓越している。

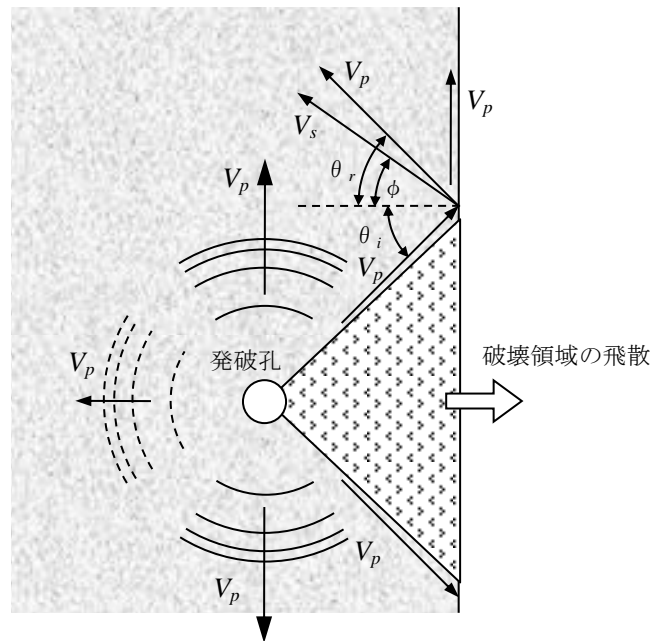
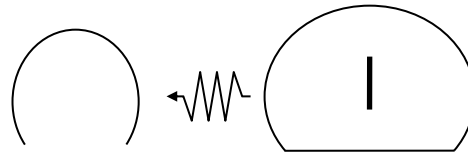


図 6.9 P波の放射と反射，S波の発生イメージ

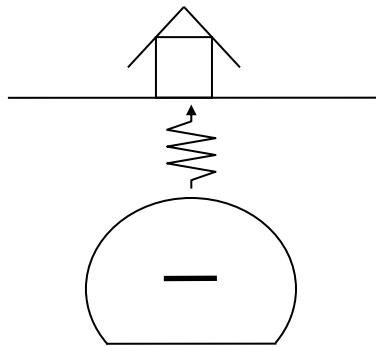
以上の結果より、自由面発破における遠方場の放射波動は、特徴的な指向性を有していることが確認された。このことより、発破振動を低減するにあたっては、トンネルと対象物との相対的位置関係に応じて自由面パターンを設計することで、効果的に振動低減を図

ることができると言える。一般的なトンネル発破では、発破振動を低減すべき制約物件に対して自由面が垂直となるようにパターン設計することが合理的である（図 6.10）。

なお、このような波動の指向性が計測された事例は、これまでのところ見当たらない。従来は発破後の波動の指向性に関する知見が無かったこと、そして、このような波動場を実際の施工現場で計測することが非常に困難なためと考えられる。とは言え、今回のような等方均質な検討条件において、指向性を持った波動場が発生することは解析上明らかであることから、まずは当該結果をふまえて自由面のパターンを検討することが望ましいと考える



(a) 制約物件が側方に位置するケース



(b) 制約物件が上方に位置するケース



(c) 制約物件が斜め上方に位置するケース

図 6.10 自由面形成パターンのイメージ図

6.5 境界要素法を用いた波動伝搬特性の検証

前節では、放射波動エネルギーの遠方場近似により、遠方場において S 波が指向性を持って卓越することが示された。本節では、このような S 波の存在についてより詳細な検証を行なう。

当該の S 波は、発破孔から放射された P 波が自由面で反射する際に発生していると推測される。そこで、発破直後のごく短い間における発破孔近傍の波動伝搬特性について、2次元の動弾性時間域境界要素法を適用して、その解明を試みる。

用いる要素は1次要素とし、最小抵抗線長を $d=30\text{cm}$ 、自由面長を $L=2.0\text{m}$ とし、発破孔を 10 要素、自由面を 100 要素で離散化した（図 6.11）。解析の時間増分は $dt=5\times 10^{-6}\text{s}$ とし、100step（0.0005s）まで解析を行なった。物性値は、せん断弾性係数 $G=20\text{GPa}$ 、縦波伝搬速度 $V_p=4,800\text{m/s}$ 、横波伝搬速度 $V_s=2,770\text{m/s}$ とした。この解析条件のもと、発破孔要素の法線方向に単位圧力加振したときの境界要素解を求め、積分表現式により、解析領域内の内点変位を求めた。

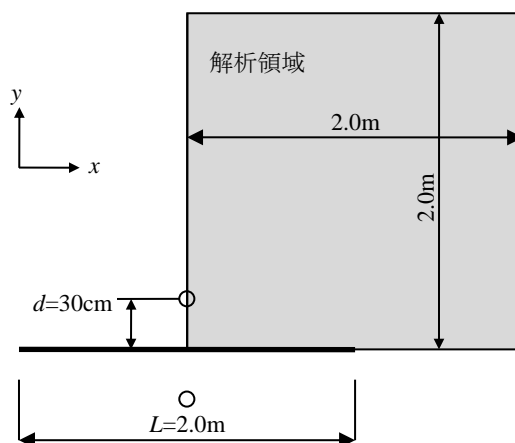


図 6.11 波動伝搬特性解析モデル

解析結果を図 6.12 に示す。発破直後、第 1 波目の P 波が発破孔に対して同心円状に伝搬していることが確認できる。この P 波が自由面に到達した後、第 2 波目として P 波の反射波が同心円状に伝搬している。この第 2 波目の P 波は、第 1 波目よりエネルギーが高くなっているが、上下対象で解析していることから、反対側の発破孔から放射された P 波も

含んでいるためと考えられる。さらに第3波目として、これとは別の平面的な反射波が発生し、ある角度（自由面に対して約 35° ）を持って伝搬している。

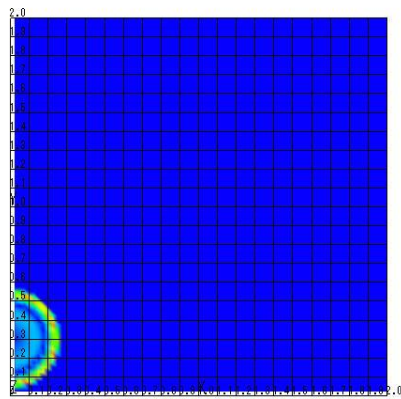
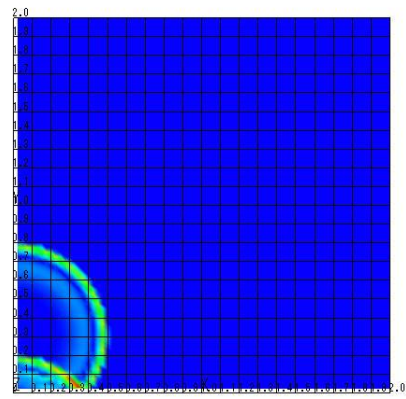
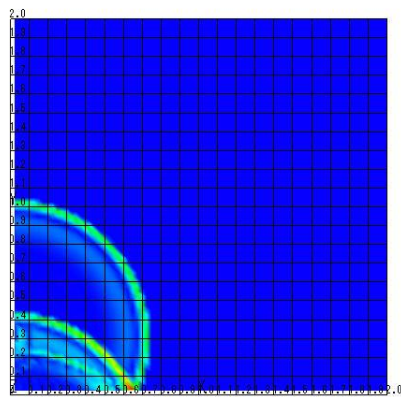
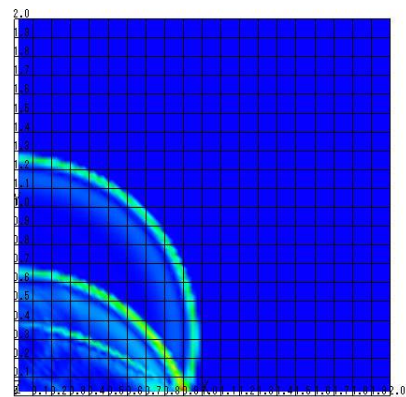
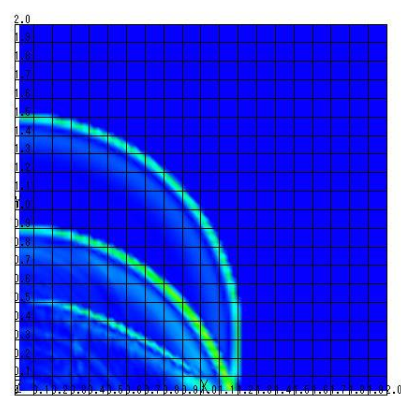
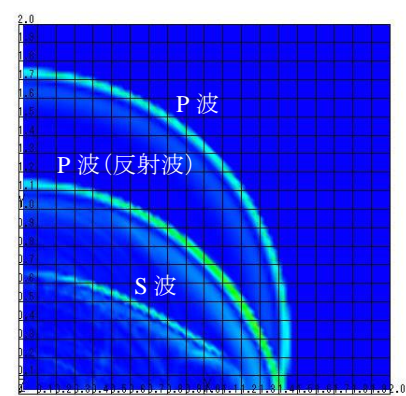
(a) $t=0.000050\text{s}$ (b) $t=0.000100\text{s}$ (c) $t=0.000150\text{s}$ (d) $t=0.000200\text{s}$ (e) $t=0.000250\text{s}$ (f) $t=0.000300\text{s}$

図 6.12(1) 境界要素解析結果

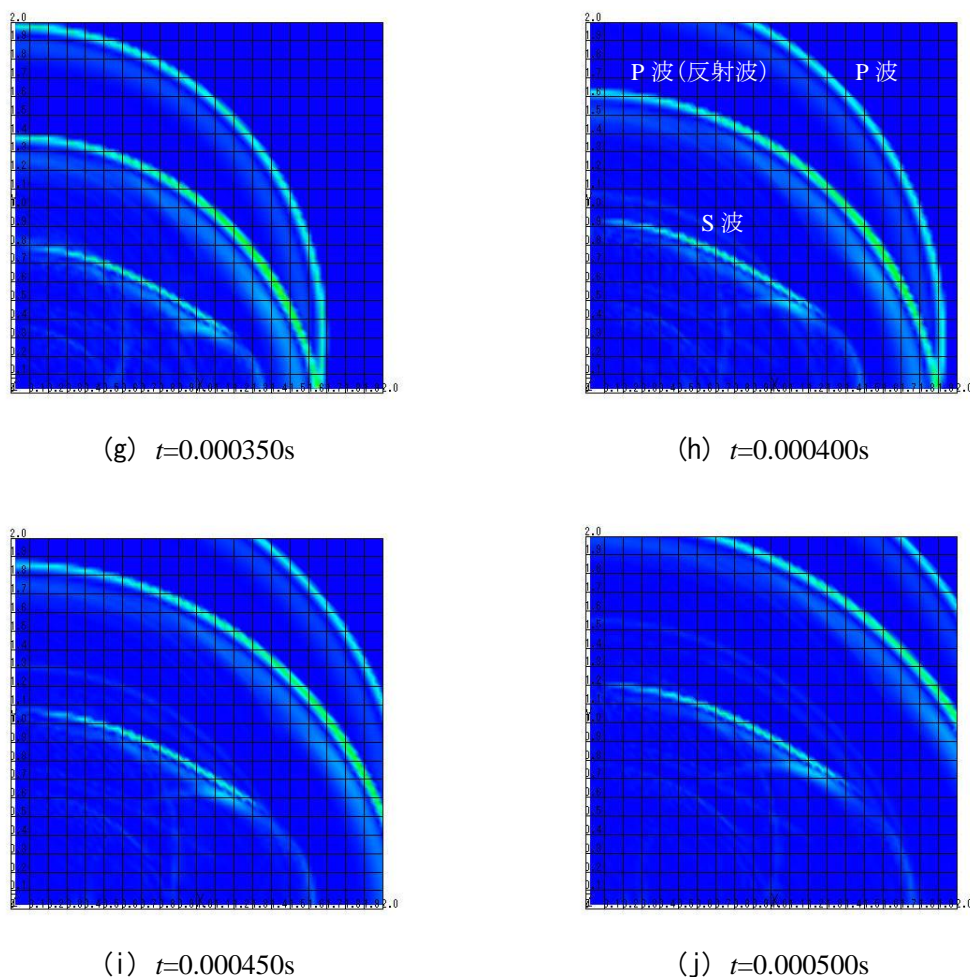


図 6.12(2) 境界要素解析結果

この平面的な反射波は、20step ($t=0.0001\text{s}$) で約 0.275m 伝搬していることから、伝搬速度は約 $2,750\text{m/s}$ と算出される。これは $V_s=2,770\text{m/s}$ とほぼ等しいことから、この平面的な反射は S 波であると判断できる。P 波が自由面に到達した際、一部は P 波として反射するが、残りは力のつりあいを保つために S 波に変換されていると考えられる。また、図を見て分かるとおり、P 波の波面は曲面であり球面波（円筒波）として伝搬しているが、S 波の波面は平面に近い形状であり平面波として伝搬している。球面波である P 波は、媒体内部を伝搬する際に距離減衰するだけでなく、伝搬距離 r に応じて広がって伝搬するため、エネルギー保存則により単位面積あたりのエネルギーは r の 2 乗に比例して幾何減衰する。一方で、当該 S 波は、両端部を除いて平面波に近い形態であるため、距離減衰するのみで幾何減衰はゼロである。このため、S 波は P 波と比較して距離減衰しにくいと、遠方場

においても大きな放射エネルギーを維持できると考えられる。

自由面の長さを $L=1.0\text{m}$ および 1.5m とした場合の解析結果を図 6.13～14 に示す。 $L=2.0\text{m}$ の場合 (図 6.12) と比較して、発生した S 波の幅が狭くなっていることから、この放射エネルギーは小さいと考えられる。

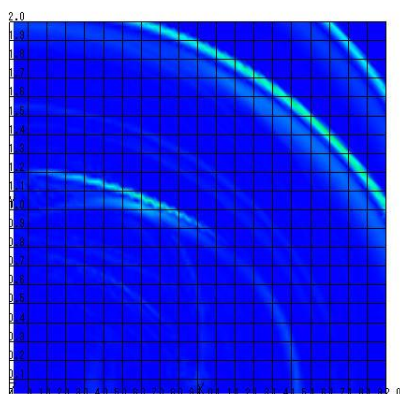


図 6.13 境界要素解析結果
(自由面長 $L=1.0\text{m}$, $t=0.000500\text{s}$)

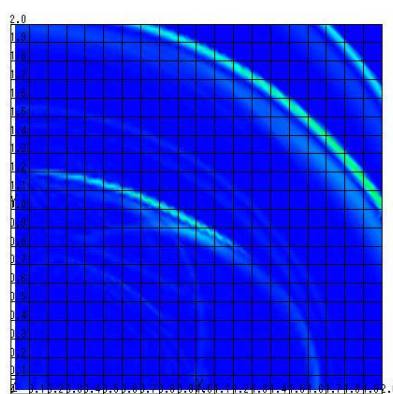


図 6.14 境界要素解析結果
(自由面長 $L=1.5\text{m}$, $t=0.000500\text{s}$)

以上のことより、

- ・自由面を設けることで指向性を持った S 波が発生する
- ・自由面長を長くすることで S 波が卓越する
- ・S 波の卓越する方向は自由面に対して約 35° である

ことが確認できた。この結果は、前節における遠方波動場の解析結果を裏付けるものである。

6.6 理論解による S 波の検証

前節の動弾性時間域境界要素法により推測された S 波の発生メカニズムについて、理論解による検証を追加する。

発破孔の位置を点 P、最小抵抗線長を d とし、ここから放射された P 波は、時刻 t ($> d/V_p$) において自由面で反射し S 波を発生させる。この時の S 波の先端位置 $Q(t)$ を図 6.15 に示す。ここで、P 波の放射角度は $\varphi < \varphi_0 = \tan^{-1} \sqrt{(V_p t/d)^2 - 1}$ 、P 波が自由面に到達する位置 x_1 は $x_1 = d \tan \varphi$ である。

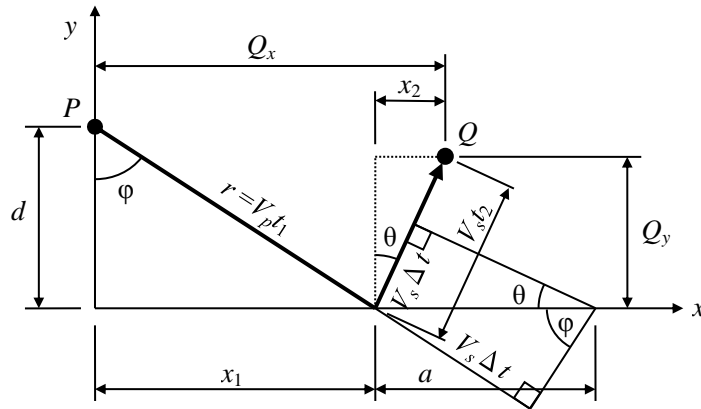


図 6.15 P 波の反射により発生する S 波面の位置 $Q(t)$

$x=x_1$ において、P 波が x 軸に沿って伝搬する速度 V は次式で与えられる。

$$V = \frac{a}{\Delta t} = \frac{V_p}{\sin \varphi} \quad (6.29)$$

点 x_1 から発生する S 波が伝搬する角度は、 y 軸とのなす角 θ として次式で与えられる。

$$\sin \theta = \frac{V_s \Delta t}{V \Delta t} = \frac{V_s}{V_p} \sin \varphi \quad (6.30)$$

$x=x_1$ に P 波が到達する時刻 t_1 は次式で表される。

$$t_1 = \frac{d}{V_p} \cos \varphi \quad (6.31)$$

よって、S波が発生してから点 Q に到達するまでの時間 t_2 および S 波の伝搬距離 D はそれぞれ以下のように与えられる．

$$t_2 = t - t_1 = t - \frac{d}{V_p \cos \varphi} \quad (6.32)$$

$$D = V_s t_2 \quad (6.33)$$

以上より、P 波が自由面で反射して発生する S 波の位置 Q は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} Q_x &= x_1 + x_2 = d \tan \varphi + V_s t_2 \sin \theta \\ Q_y &= V_s t_2 \cos \theta \end{aligned} \quad (6.34)$$

P 波が自由面に到達した直後 ($t=0.00022\text{s}$) における S 波面の形状を式(6.34)で求めた結果を図 6.16 に示す．この S 波面は、 y 軸近傍では曲面を示しているが、 y 軸から離れるに伴って平面的であり平面波として伝搬していることを示している．この結果は、図 6.12～6.14 において示された S 波面の形状と同様である．

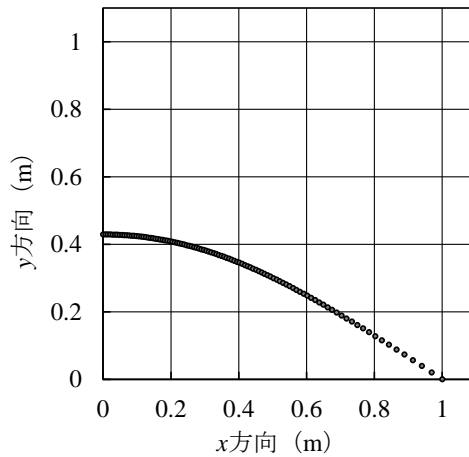


図 6.16 理論解による S 波面 ($t=0.00022\text{s}$)

さらに,これと同時刻における境界要素解析の結果とを重ね合わせたものを図 6.17 に示す. 境界要素解析の結果は理論解とよく一致している. これらのことから, P 波が自由面で反射した際に発生する波動は S 波であり,平面波に近い性質を有していると判断できる.

また,自由面が長くなるほど S 波は距離減衰の小さな平面波に近づいていく様子が確認できる. このことから,自由面が長くなるほど遠方場において指向性を持った S 波が卓越することが推測される.

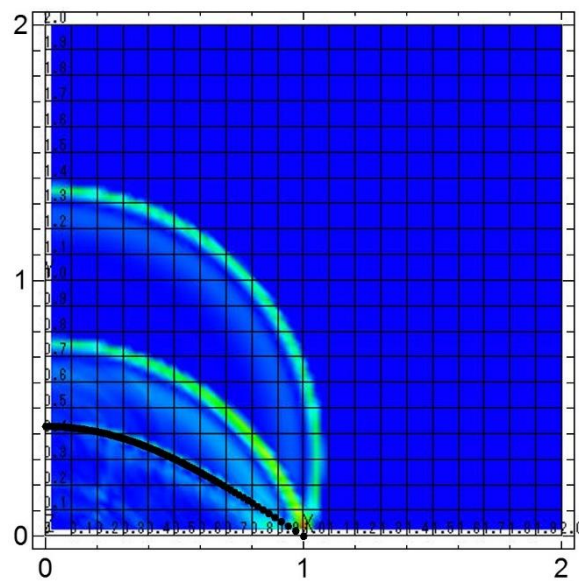


図 6.17 理論解と境界要素解析結果との比較 ($t=0.00022s$)

6.7 第6章のまとめ

本章では、個別要素解析結果から得られた発破孔近傍における波動場に対して遠方場近似を適用することで、発破孔から放射された波動の遠方場における伝搬特性を求めた。ここでは、発破振動が問題となる低周波域として 200Hz 帯に着目し、遠方波動場について考察した。また、得られた結果に対して、動弾性時間域境界要素法および理論解を用いて検証した。この結果、自由面発破における波動の伝搬特性を把握することができた。得られた成果を以下にまとめる。

- a) 発破孔から放射され遠方場に伝搬する波動は、P 波および S 波の成分を有しており、それぞれ指向性が異なる伝搬特性を示す。
- b) P 波は、自由面と平行方向に卓越した波動場が形成され、自由面と鉛直方向の波動は小さい。このような P 波の指向性は、発破後に自由面側で破壊領域が形成されて反力体が無くなり、自由面と鉛直方向に P 波の放射が小さくなるためと推測される。
- c) S 波は、発破孔から放射された P 波が自由面で反射する際に発生するものであり、自由面と鉛直方向および平行方向にはほとんど発生しないが、自由面に対して約 35° 方向に卓越した波動場が形成される。
- d) 上記の S 波は、自由面長を長くすることによってさらにエネルギーが強くなり、遠方場において卓越する。

以上のことをふまえると、自由面発破における自由面パターンは、発破振動を低減すべき制約物件に対して自由面が鉛直となるように設計することが合理的と判断できる。

第6章の参考文献

- 1) 例えば 北原道弘, 中川克也: 3次元クラック問題に対する弾性散乱断面積, 境界要素法論文集, Vol.12, pp.75-80, 1995.
- 2) 小林昭一 編著: 波動解析と境界要素法, 京都大学学術出版会, 2000.
- 3) 阿部和久, 加藤宏輝, 古田勝: 地下鉄周辺地盤における波動の伝播特性, 鉄道力学論文集, Vol.9, pp.43-48, 2005.
- 4) 例えば 赤間健一, 川中卓: PS 変換波を用いた地震探査, 石油技術協会誌, Vol.74, No.3, pp.247-251, 2009.

第7章

自由面発破の振動低減効果の解明

7.1 概要

第2章において、自由面発破パターンの合理的な設計手法が確立されていない背景として、振動低減効果の定性的かつ定量的な議論が十分になされておらず、自由面による振動低減効果のメカニズムが十分に解明されていないこと示した。今後、自由面発破の経験的な設計手法を脱し、合理化や最適化を図っていくためには、自由面の効果メカニズムについて議論する必要があると考える。

これまで、効果メカニズムが明らかにされていない要因として、実際の施工現場で計測等によりこれを明らかにすることが困難であること、そして、これらを議論するための数値解析手法が存在していなかったことが挙げられる。

このような状況のなか、本研究では第5章において自由面発破に対する個別要素解析手法の妥当性について検証を行ない、一定の信頼性があることを確認した。自由面の効果メカニズムを明らかにするための議論に、この解析手法の適用は効果的と考える。

そこで本章では、第4章および第6章で構築した解析手法を用い、自由面による振動低減のメカニズムについて、解析的に明らかにすることを試みた。ここでは、自由面による効果を容易に議論するため、心抜き発破を対象とし、自由面の無い通常の発破と自由面発破とを比較することで、自由面による振動低減効果のメカニズム解明のための解析を行った。

(2) モデル化

解析モデルを図 7.3 に示す。解析領域は、第 6 章の解析と同じ半径 6m の半円形、エネルギー評価境界の半径を 3m とした。境界条件も同様に、自由面側は水平変位および回転を拘束し、外周は粘性境界として処理した。また、自由面の長さは $L=2.0\text{m}$ とした。

最小抵抗線長を大きくすることで通常の心抜き発破の状態に近づいていくと考えられることから、発破孔の位置は最小抵抗線長を $d=10\sim100\text{cm}$ と変化させることで、自由面発破と近似した通常の心抜き発破との比較を試みた。また、個別要素メッシュの影響を検証するため、最小抵抗線長ごとにそれぞれメッシュを変更した 10 ケースの解析を行なった。

解析パラメータは、対象を中硬岩地山と想定して表 6.1 と同じとした。解析上の時間増分 Δt は $1.0\times10^{-8}\text{s}$ とした。

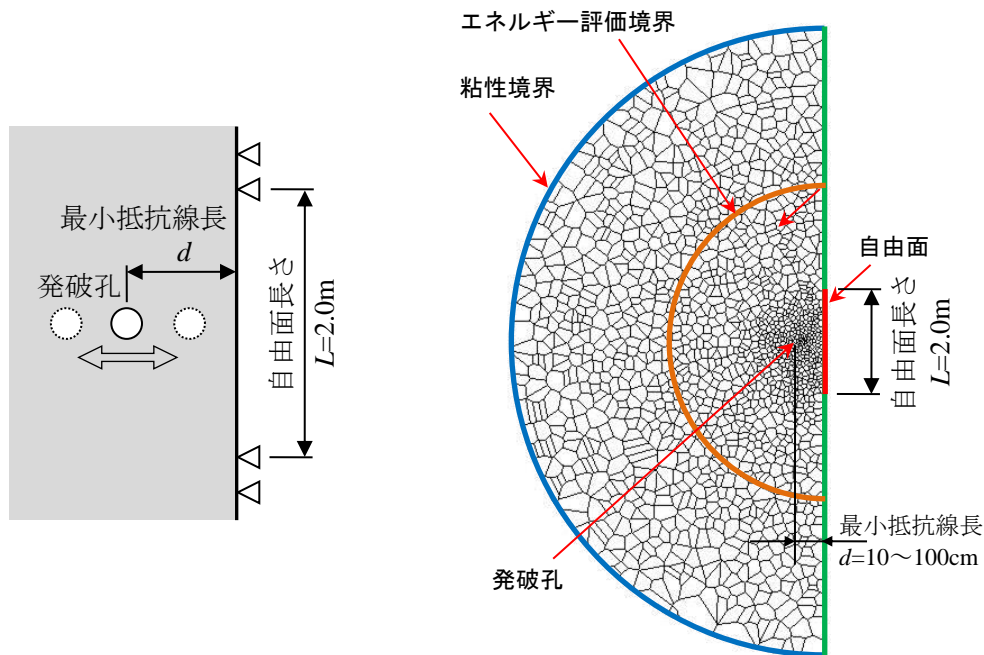


図 7.3 解析モデル

(3) ガス圧

第 5 章では、発破実験の結果を使用してガスの圧力波形を逆解析により求めた。ただし、この結果は最小抵抗線長 $d=40\text{cm}$ という条件のもとで求められたものである。しかしながら、抵抗線長を変化させた場合、それに応じて破壊状況が変わってガスの占める体積も変化するため、次式に示す断熱変化における理想気体の状態方程式¹⁾にしたがえば、ガス圧

も変化するはずである。

$$P = c \rho^\gamma \quad (7.1)$$

ここに、 P は気体の圧力、 c 、 γ は係数、 ρ は密度である。ここで、比体積 $v = 1/\rho$ とし、状態変化の前後で一定とすれば次式を得る。

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (7.2)$$

ここに、 V は気体が占める体積、 γ は気体定数 ($\gamma=2.87$) である。たとえば、最小抵抗線長を小さくした場合、破碎片は大きく飛散し、これに伴ってガス圧が作用する体積も大きくなるため、ガス圧は低下する。

そこで、まず発破実験から得られた圧力波形の時刻歴 $P(t)$ と体積の時刻歴 $V(t)$ を求める。続いて、状態方程式より求めた式(7.3)により、体積変化が無かった場合の圧力 $P_0(t)$ を発破孔の体積 V_0 から求める (Step.1)。最後に、最小抵抗線を変えた場合の破碎片の拡がりから気体が占める体積 $V'(t)$ を求め、式(7.4)より $P'(t)$ を算出する (Step.2)。

$$\text{体積変化がない場合： } P_0(t) = P(t) \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^\gamma \quad (7.3)$$

$$\text{体積変化がある場合： } P'(t) = P_0(t) \left(\frac{V_0}{V'(t)} \right)^\gamma \quad (7.4)$$

最小抵抗線長 d を変えた場合に推定されるガスの圧力波形を図 7.4 に示す。ここでは、発破実験で得られた圧力波形 P 、体積変化がない場合の圧力波形 P_0 、および最小抵抗線長 d を 10cm、30cm、50cm と変化させた場合の圧力波形をプロットした。 d が小さくなるほど自由面側の破壊が著しくなり、ガスの体積 V' も大きくなるため、圧力波形のピークは小さくなる。また、 $d=40\sim 50\text{cm}$ 程度以上では圧力波形はほとんど変化しないため、ここでは省略した。

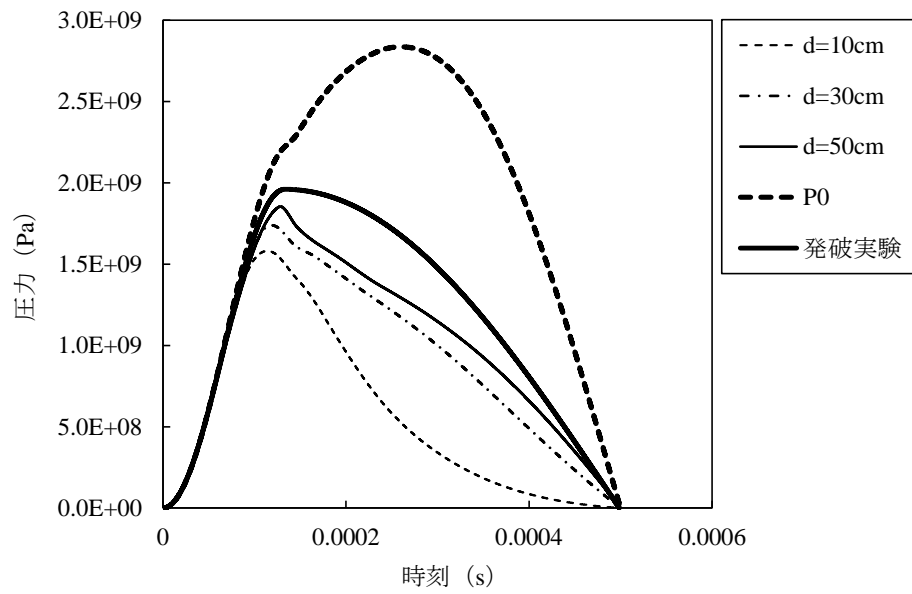


図 7.4 最小抵抗線長を変えた場合のガス圧力波形の推定

7.3 最小抵抗線長を変えた場合の解析結果

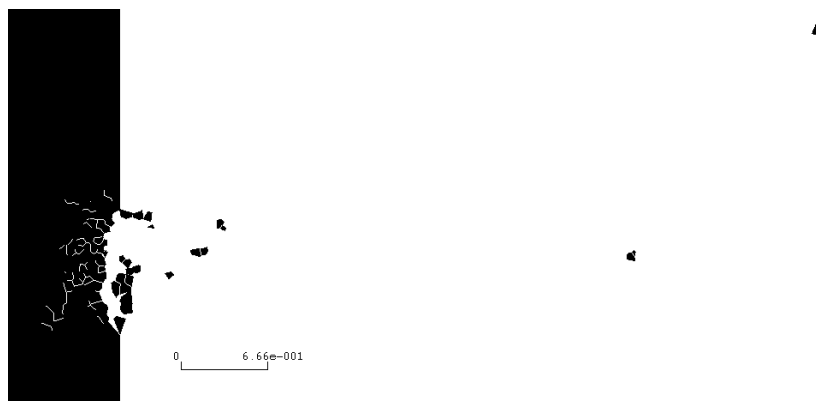
(1) 破壊状況

最小抵抗線長を変えた場合の代表的な破壊状況を図 7.5 に示す。前章までと同様に、 $t=0.02\text{s}$ 時点での破壊状況を示す。

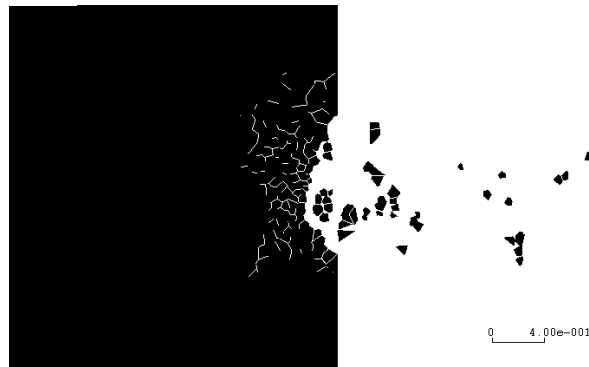
最小抵抗線長 d がごく小さい場合（10cm 以下）、自由面側の破壊は浅い領域が剥離するように破壊しているにとどまっているが、破壊片は遠方にまで飛散している。破壊領域が非常に小さいことから、発破本来の目的である岩盤破碎という観点からはきわめて非効率である。一方、地山側の亀裂は比較的浅い範囲にとどまっており、このことから推測すれば、外周への波動の放射は小さいと考えられる。発破によるエネルギーのほとんどが、少量の破壊片を遠方に飛散させることに費やされている状態と言える。

d が大きくなるに伴い（おおむね 20～40cm）、自由面側ではクレーター状の破壊領域が拡大しており、効率的な掘削が可能となるが、一方で、地山側の亀裂発生範囲もやや拡大するようになっており、このことから外周への波動放射も大きくなると推測される。

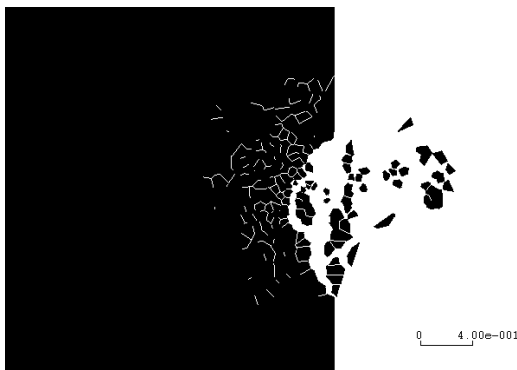
d が一定以上大きくなると（おおむね 50cm 以上）、自由面側において亀裂の発生領域がクレーター状の形状を示すものの、顕著な破壊面が発達するほどではなく、破壊片の飛散挙動も見られない。また、地山側においても亀裂が広い範囲で発生している。今回の解析では爆薬量を一定としているため、大きな破壊抵抗線長に対して爆薬量が不足気味となり、発破孔近傍で亀裂を発生させることはできるものの、自由面側で明瞭な破壊面を発生させるだけのエネルギーが足りていないためと考えられる。これは“ゆるめ発破”のような状態とも言えるが、岩盤破碎という観点では効率は低い。発破によるエネルギーは、限定的な亀裂発生と外周への波動放射に費やされていると推測される。



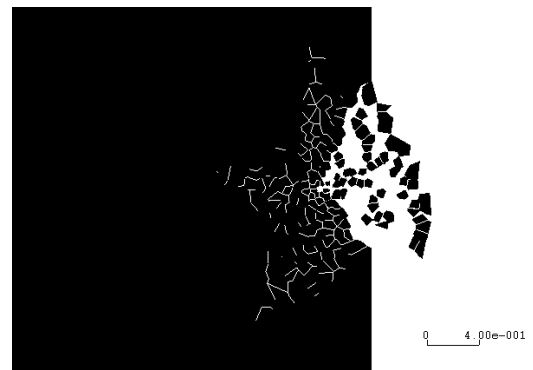
(a) $d=10\text{cm}$ (b~j の60%スケールで表示)



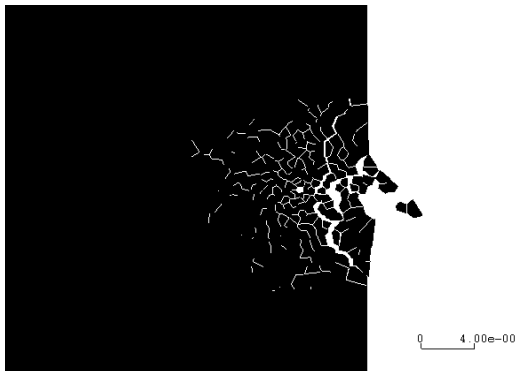
(b) $d=20\text{cm}$



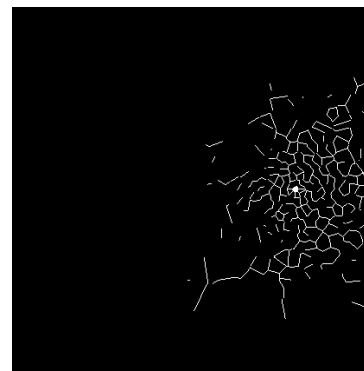
(c) $d=30\text{cm}$



(d) $d=40\text{cm}$

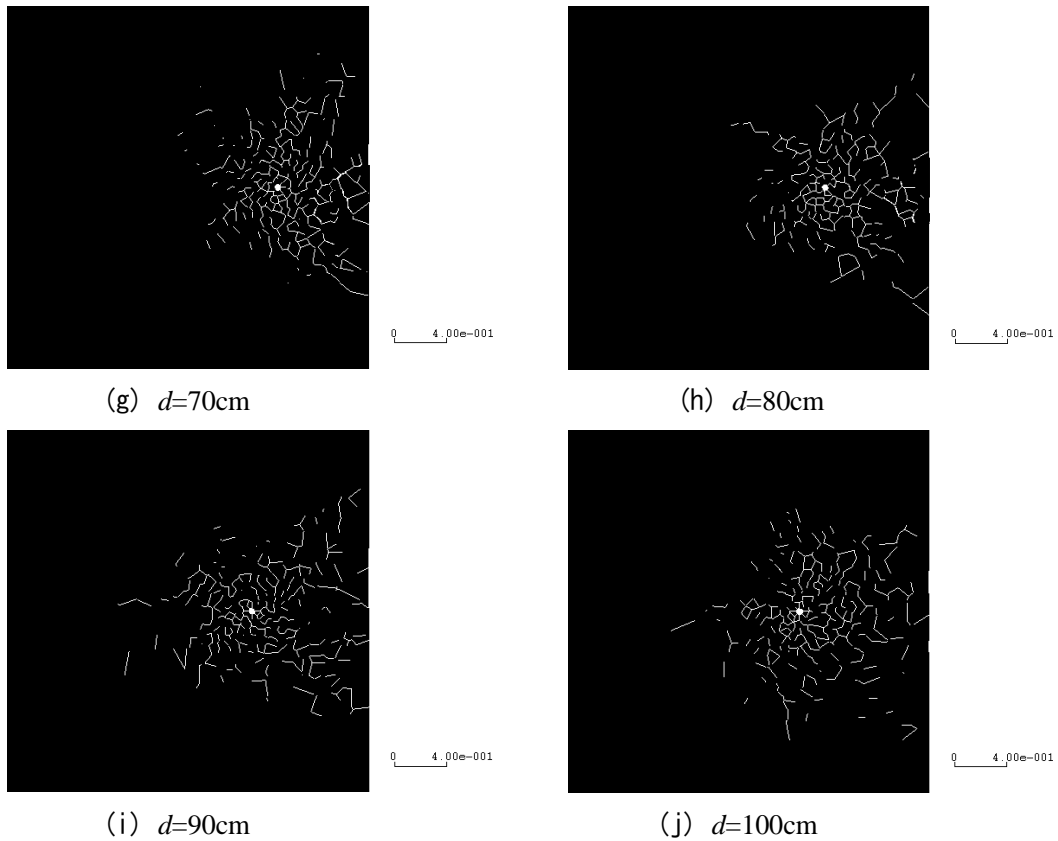


(e) $d=50\text{cm}$



(f) $d=60\text{cm}$

図 7.5(1) 最小抵抗線長を変えた場合の破壊状況 ($t=0.02\text{s}$)

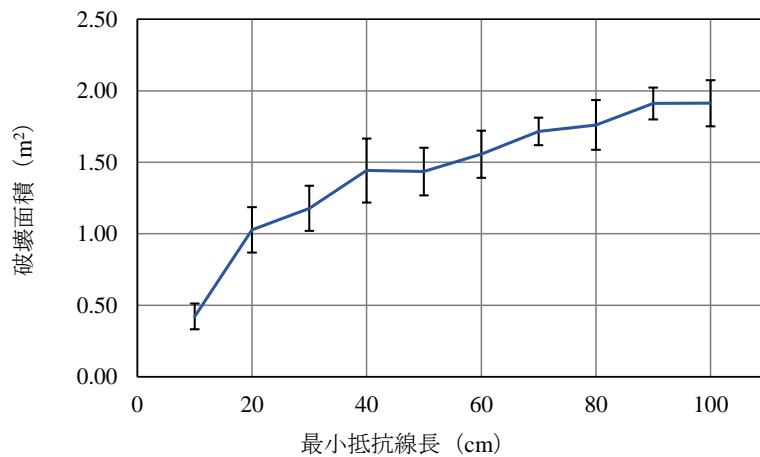
図 7.5(2) 最小抵抗線長を変えた場合の破壊状況 ($t=0.02\text{s}$)

以上のように、最小抵抗線長 d が小さいほど破壊領域が小さく、 d が大きくなるに伴って破壊領域が大きくなる傾向があるが、 d がある程度大きくなると破壊領域はそれ以上拡大しなくなる。逆に、 d が小さいほど外周への波動放射が小さく、 d が大きくなるに伴って波動放射も大きくなると推測される。

このときの破壊面積を表 7.1 および図 7.6 に示す。ここで、破壊面積は破壊基準に達した要素辺を有する個別要素面積の積分としている。上述の最小抵抗線長 d と破壊状況の関係を裏付ける結果が、破壊面積にも現れている。すなわち、 d が大きくなるにしたがって破壊面積は増加する傾向にあるが、おおむね d が 40cm あたりを越えると破壊面積の増加傾向が緩くなっている。ただし、おおむね $d=40\text{cm}$ 以上では“ゆるめ発破”の状態になっていることから、破壊面積で表されているよりは破碎の効果は限定的と考える。

表 7.1 最小抵抗線長を変えた場合の破壊面積 ($t=0.02s$)

最小抵抗線長 (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
破壊面積 (m^2)	0.42	1.03	1.18	1.44	1.44	1.56	1.72	1.76	1.91	1.91
(標準偏差)	0.09	0.16	0.16	0.22	0.17	0.17	0.10	0.17	0.11	0.16

図 7.6 最小抵抗線長を変えた場合の破壊面積 ($t=0.02s$)

(2) 各種エネルギー

最小抵抗線長 d を変えた場合の各種エネルギーを表 7.2 および図 7.7 に示す. ここでは, 10 ケースの解析結果の平均値を示した.

ここで, 入力エネルギーは, 発破孔を取り囲む個別要素に対して成した仕事量として, 変位速度 \dot{u} と応力 σ の積の時間積分として算出した. 放射波動, 破壊および運動エネルギーは第 4 章に示した方法により算出し, それ以外のエネルギー (ひずみ, 減衰) は, 入力エネルギーから放射波動, 破壊および運動エネルギーの合計を差し引いた値として算出した.

放射波動エネルギー (図 7.7(a)) および破壊エネルギー (図 7.7(b)) は, 最小抵抗線長 d が大きくなるに伴って増加する傾向にあるが, ある程度大きくなると (おおむね 40cm 以上) 横ばい傾向を示している. これは, 破壊状況で確認したとおり, d の増加に伴って地山側の亀裂範囲が拡大し, これと同時に放射波動エネルギーも増加しているためと推測される. 破壊エネルギーについては, 破壊面積と相関性が高いはずであるため, 当然の傾向

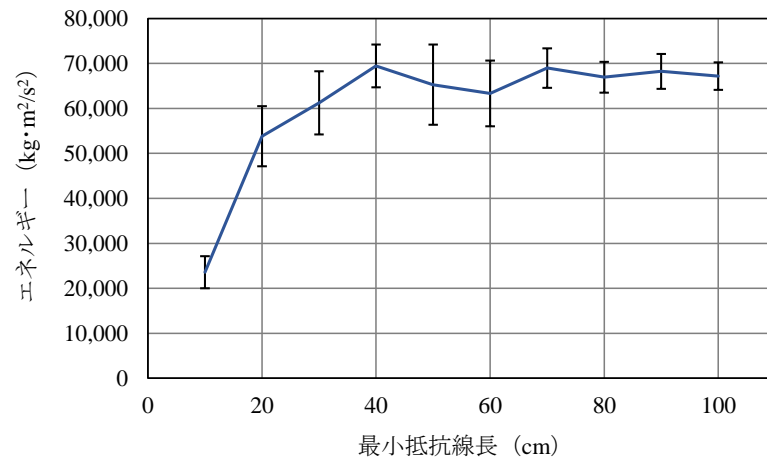
である。また、爆薬量が一定であるため、 d が一定以上大きくなると破壊が限定的となり、両者ともに増加しなくなると考えられる。なお、 $d=50\text{cm}$ および 60cm のケースで放射波動エネルギーがやや減少しているが、この2ケースは他のケースと比較して標準偏差が大きくなっていることから、個別要素メッシュの違いによるバラツキの影響がやや大きかったものと考えられる。解析ケースを増やすことで、滑らかな横ばい傾向に収束するものと推測される。

運動エネルギー（図 7.7(c)）は、前者とは異なり、 d の増加に伴って減少する傾向を示している。これについても、破壊状況で確認できるように、 d がごく小さい場合は破壊片が遠方に飛散しているのに対し、 d の増加とともに破壊が小規模となり亀裂が発生するのみにとどまるためである。

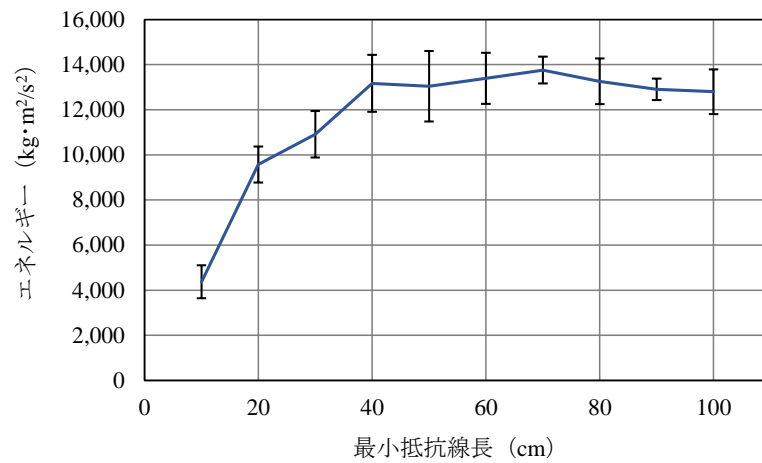
以上のように、振動の低減を図る場合には、自由面発破を採用して最小抵抗線長をより小さくすることで放射波動エネルギーを低減することが有効であるが、一方で発破掘削の効率が大きく損なわれることが分かる。逆に、自由面発破の特徴を弱めて最小抵抗線長を大きくすると、掘削効率は向上するものの、放射波動エネルギーが大きくなる。これらのことから、自由面発破においては、掘削効率と振動低減との間にはトレードオフの関係が存在すると結論づけられる。

表 7.2 最小抵抗線長を変えた場合の各種エネルギー

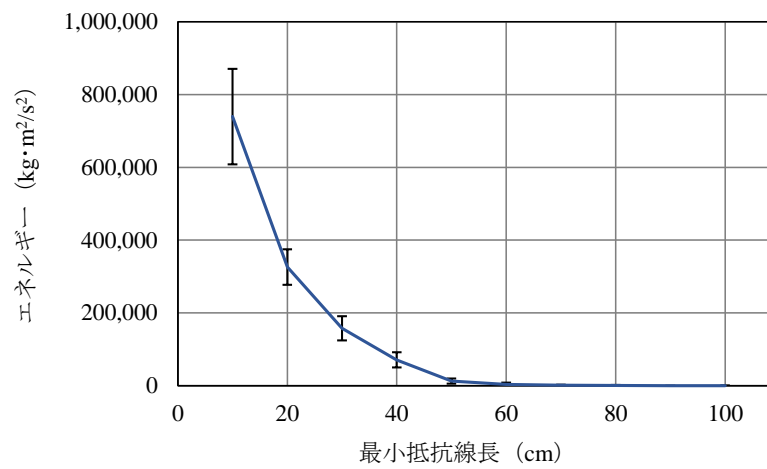
		最小抵抗線長 (cm)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
各種エネルギー ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$)	① 入力エネルギー	1,628,806	1,386,533	1,190,276	1,141,916	994,647	952,912	994,543	995,556	979,597	978,625
	② 放射エネルギー	23,574	53,815	61,228	69,433	65,287	63,350	68,986	66,931	68,251	67,206
	③ 破壊エネルギー	4,373	9,572	10,915	13,169	13,042	13,394	13,760	13,263	12,909	12,801
	④ 運動エネルギー	739,639	325,955	157,950	71,172	12,826	3,685	1,304	774	15	129
	⑤ ひずみ + 減衰 ① - (②+③+④)	861,220	997,191	960,183	988,142	903,492	872,483	910,493	914,589	898,422	898,489
エネルギー比 (%)	⑥ 放射+運動+破壊 (②+③+④) / ①	47.1	28.1	19.3	13.5	9.2	8.4	8.5	8.1	8.3	8.2
	⑦ ひずみ+減衰 ⑤ / ①	52.9	71.9	80.7	86.5	90.8	91.6	91.5	91.9	91.7	91.8
エネルギー比 (%)	⑧ 放射エネルギー ② / (②+③+④)	3.2	13.8	26.9	45.8	71.7	79.0	82.1	82.6	84.1	83.9
	⑨ 破壊エネルギー ③ / (②+③+④)	0.9	2.4	4.9	8.7	14.5	16.7	16.5	16.5	15.9	15.9
	⑩ 運動エネルギー ④ / (②+③+④)	96.2	83.6	68.1	45.4	13.8	4.2	1.4	0.8	0.0	0.1



(a) 放射波動エネルギー



(b) 破壊エネルギー



(c) 運動エネルギー

図 7.7 最小抵抗線長を変えた場合の各種エネルギー

自由面発破の効率性や効果メカニズムについて検討するため、発破時のエネルギー収支として、入力エネルギーに対する「放射波動＋運動＋破壊」エネルギーの比率と「ひずみ＋減衰」エネルギーの比率を図 7.8 に示す。ここで、「放射波動＋運動＋破壊」は、発破によるエネルギーが岩盤に対して何らかの仕事（振動や破壊など）をなした割合であり、「ひずみ＋減衰」は損失した割合として理解できる。全体傾向として、「ひずみ＋減衰」エネルギーの比率の方が「放射波動＋運動＋破壊」エネルギーの比率を上回っている。また、最小抵抗線長 d の増加とともに、「放射波動＋運動＋破壊」エネルギーの比率が減少し、「ひずみ＋減衰」エネルギーの比率が増加している。とくに、 d がおおむね 50cm 以上になると、入力エネルギーのほとんどが「ひずみ＋減衰」に費やされており、発破によるエネルギーのほとんどが損失していると言える。

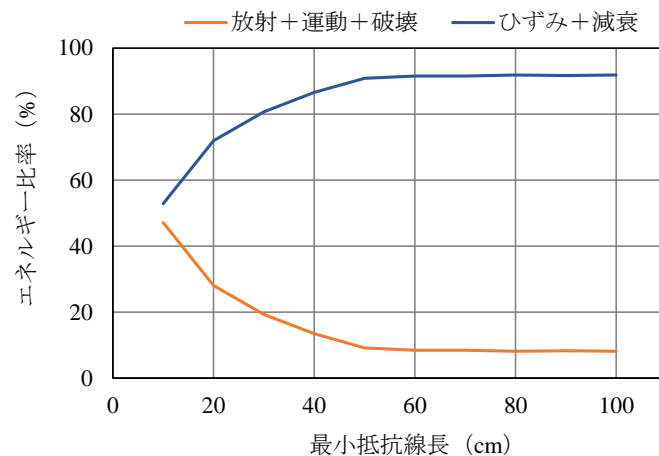


図 7.8 最小抵抗線長を変えた場合のエネルギー比率(1)

また、「放射波動＋運動＋破壊」における各エネルギーの比率を図 7.9 に示す。 d が 20～50cm の範囲において、 d と放射波動エネルギーは正比例の関係であり、 d と運動エネルギーは反比例の関係にあることが示されている。破壊エネルギーも d と比例関係にあると言えるが、その比率は全体の中では非常に小さい。また、 d がおおむね 60cm 以上では、各エネルギーはほぼ横ばいであり、 d の影響度は低い。

以上より、最小抵抗線長を小さくすることで、発破のエネルギーを破壊エネルギーと運動エネルギーに費やし、放射波動エネルギーを小さくできると判断できる。

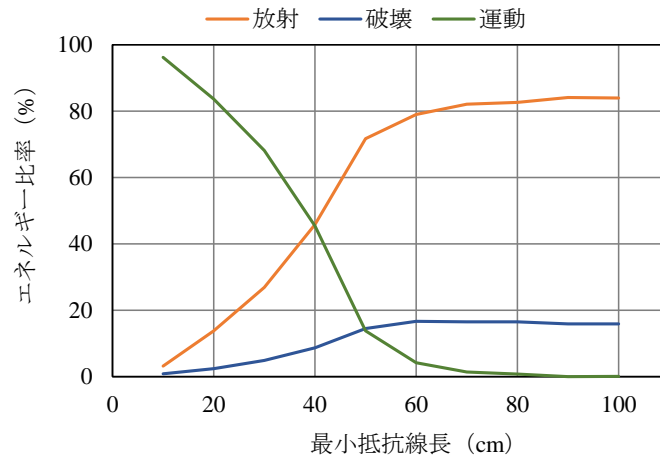


図 7.9 最小抵抗線長を変えた場合のエネルギー比率 (2)

続いて、振動の原因となる放射波動エネルギーの指向性について理解するため、解析領域を6分割し（図 7.10）、最小抵抗線長 d を変えた場合における放射波動エネルギーの指向性について調べた（図 7.11）。

d がごく小さい場合（おおむね $d=10\text{cm}$ ）、自由面と平行方向で放射波動エネルギーが大きいためであるが、そもそも放射波動エネルギー自体が小さいため、指向性としては明瞭ではない。 d が大きくなるに伴って、自由面と平行方向で放射波動エネルギーが大きくなり、自由面と鉛直となる方向で比較的小さい分布となっている。これは第6章で考察したように、自由面側で破壊領域が形成されて反力体が無い状態となるため、自由面と鉛直となる方向での波動の放射が小さくなるためと考えられる。 d が一定以上大きくなると（ここではおおむね $d=80\text{cm}$ 以上）、バラツキはあるものの、放射波動エネルギーの分布に差が小さくなる。もはや自由面の影響がほとんど無くなり、全周にわたって同様に波動が放射されるようになるためと考えられる。

以上のように、最小抵抗線長が大きい通常の発破では波動の放射における指向性は小さいが、自由面発破では自由面の存在により最小抵抗線長が小さくなり、発破孔の近傍で波動の放射に指向性が現れることが分かる。

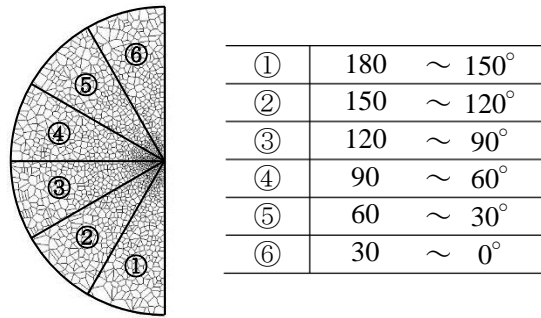


図 7.10 放射波動エネルギーの放射方向区分

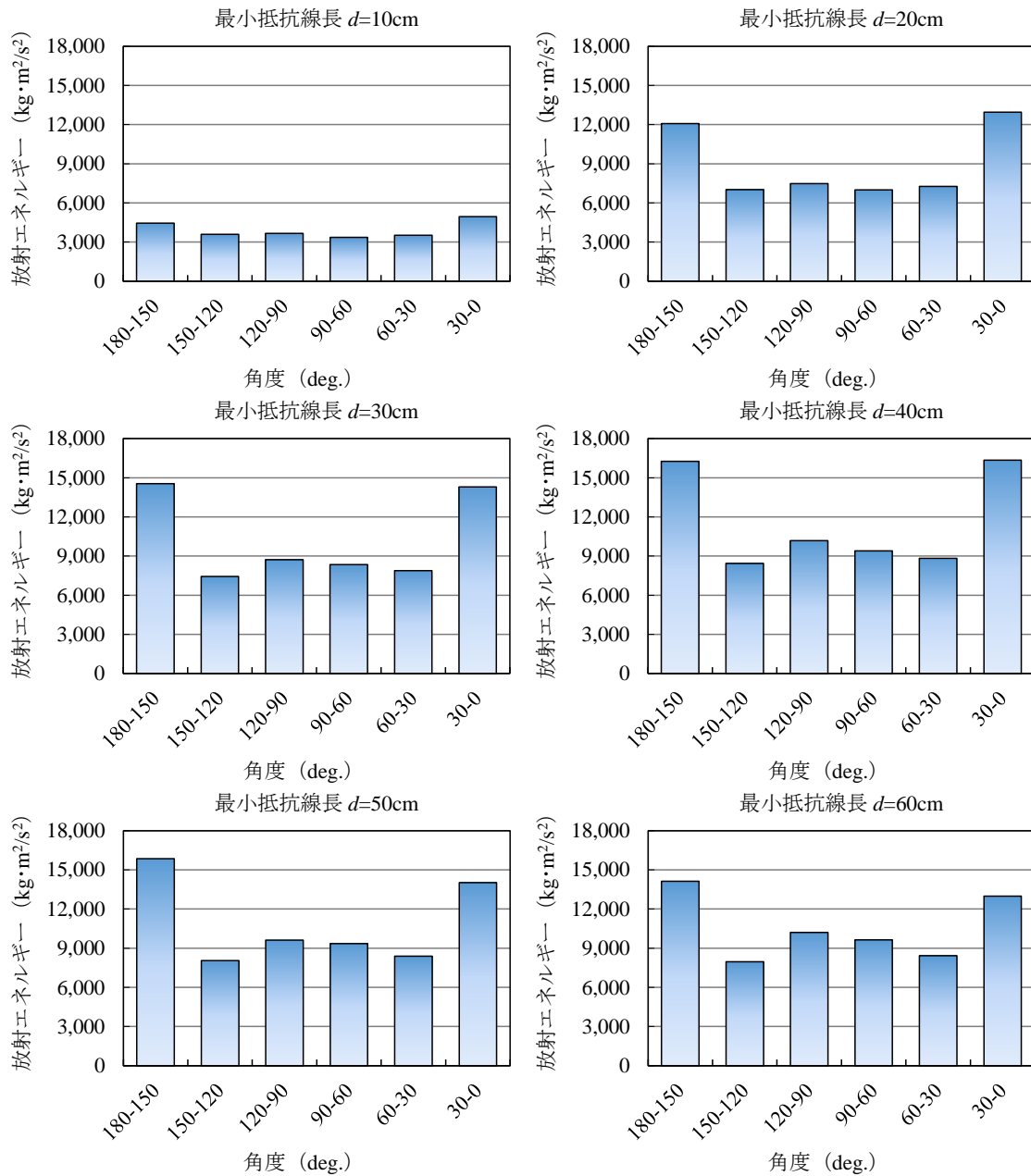


図 7.11(1) 最小抵抗線長を変えた場合の放射波動エネルギーの分布

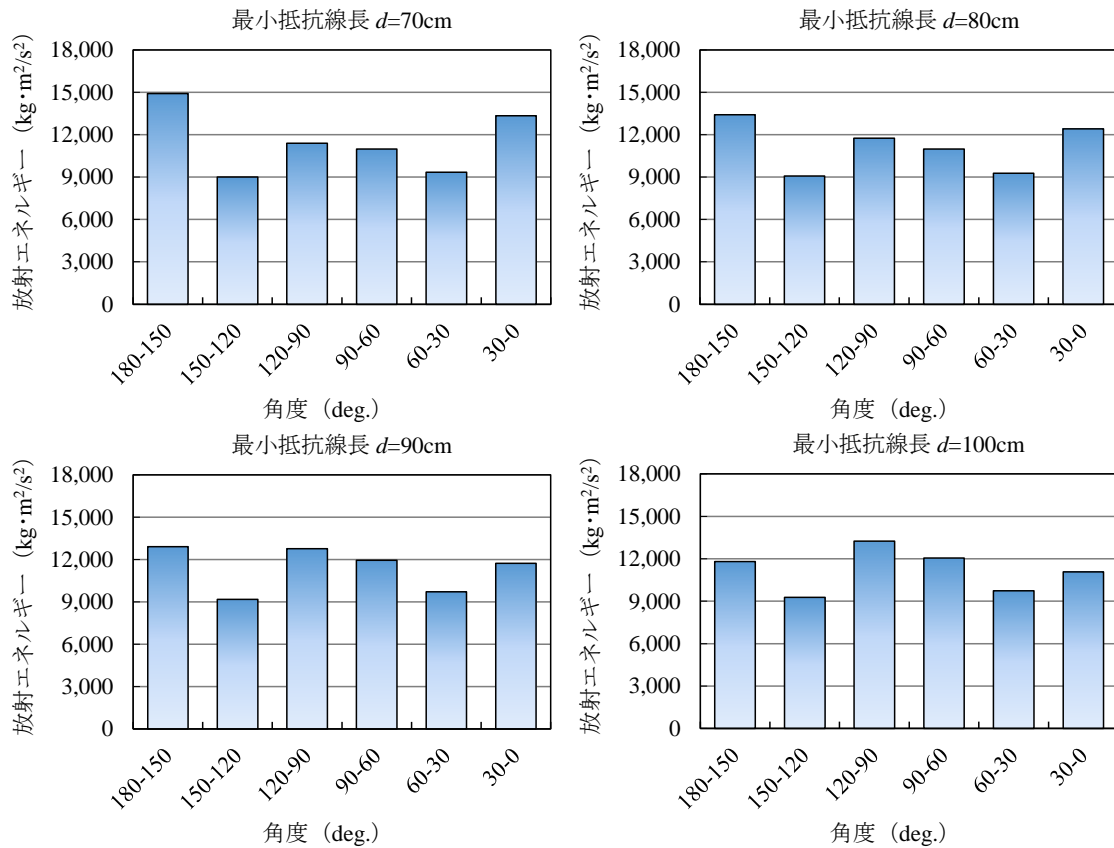


図 7.11(2) 最小抵抗線長を変えた場合の放射波動エネルギーの分布

(3) 発破効率

(1)において、自由面発破では掘削効率と振動低減との間にトレードオフの関係が存在することが示された。そこで、次式に示す発破効率 e_B の考え方²⁾を適用し、その算出結果を表 7.3 および図 7.12 に示す。

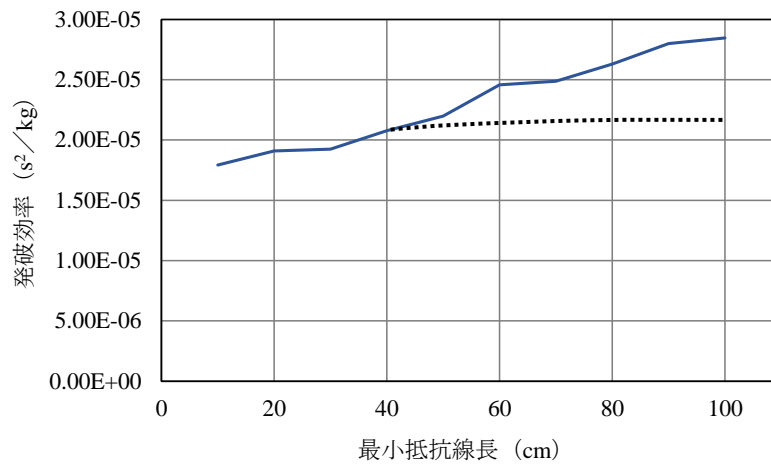
$$\text{発破効率 } e_B = \frac{\text{破壊領域面積}}{\text{放射エネルギー}} \quad (7.5)$$

e_B の値は、これが大きいほど掘削効率が高く、しかも波動の放射を小さくできることを意味している。当該解析結果では、最小抵抗線長 d の増加とともに発破効率も右肩上がりが増加している。ただし前述のとおり、 d がおおむね 50cm 以上では“ゆるめ発破”の状態であり、掘削効率はあまり高くはないと判断できることから、現実的には d がある一定値以上では、発破効率 e_B は横ばいになると考えられる（図中の点線）。

以上のことから、掘削効率と振動低減のバランスの取れた最小抵抗線長は 30~40cm 程度と考えることができる。当然ながら、掘削効率より振動低減を最優先すべき場合においてはこの限りではないため、施工条件ごとに検討する必要がある。

表 7.3 発破効率 e_B

	最小抵抗線長 (cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
発破効率 e_B $\times 10^{-5} \text{ (s}^2/\text{kg)}$	1.79	1.91	1.92	2.08	2.20	2.46	2.49	2.63	2.80	2.85

図 7.12 発破効率 e_B

(4) 放射波動の遠方場近似

発破孔から放射される波動の遠方場における平均パワーを図 7.13 に示す。最小抵抗線長 d を変えて、それぞれ 10 ケース算出した放射波動エネルギーの平均値に遠方場近似を適用した結果であり、ここでは 200Hz の成分を示した。赤のプロットは P 波を、青のプロットは S 波を、緑のプロットは P 波と S 波の合成を示す。

いずれの d においても、P 波および S 波ともに、波動場の形状は第 6 章で示したものと同様で、P 波は上下に長い瓢箪状であり、S 波はバタフライ形状である。 d の大きさによって放射パワーの大きさは変化するが、その分布形状に大きな違いは見られず、指向性に対する影響は小さいと言える。

放射されるパワーの大きさに着目すれば、 $d=10\text{cm}$ の場合ではきわめて小さくなっており、遠方場に対してほとんど波動が放射されていない。おおむね $d=20\sim 40\text{cm}$ の範囲では、

d の増加に伴って P 波および S 波ともに大きな波動が放射される傾向がある．そして，おおむね $d=40\sim 50\text{cm}$ 程度以上で，波動の大きさはほとんど増加していないことが示されている．(2)で示したトータルの放射波動エネルギーも $d=40\text{cm}$ 程度以上で増加しなくなっているが，遠方場においてもこの傾向は同様である．

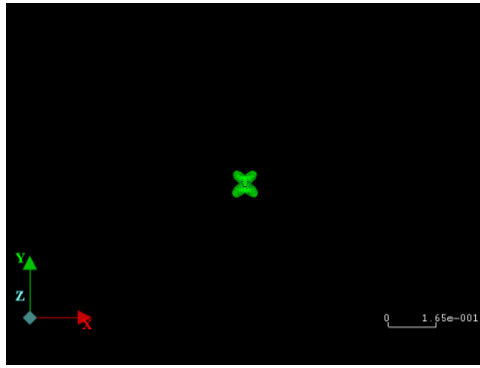
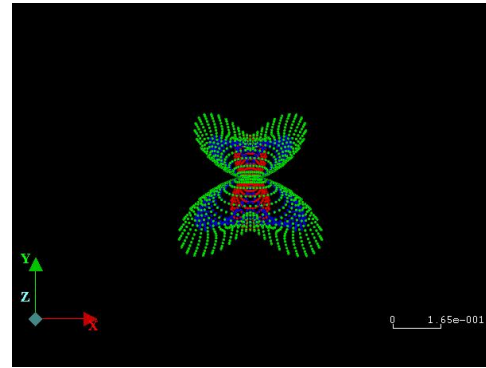
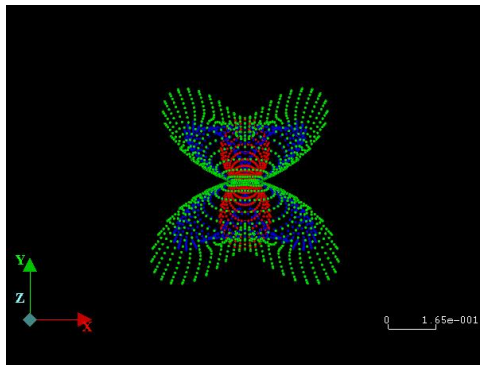
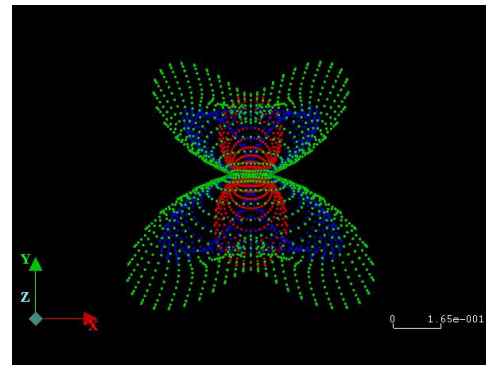
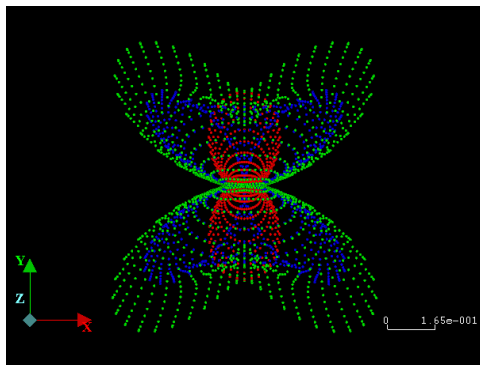
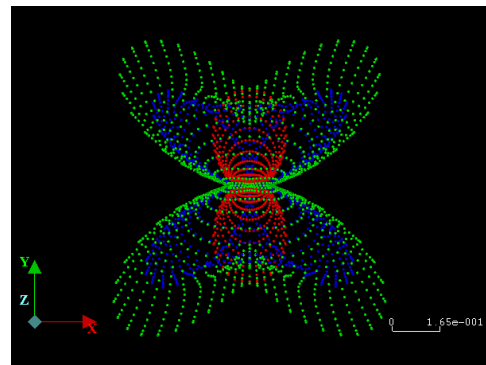
(a) $d=10\text{cm}$ (b) $d=20\text{cm}$ (c) $d=30\text{cm}$ (d) $d=40\text{cm}$ (e) $d=50\text{cm}$ (f) $d=60\text{cm}$

図 7.13(1) 放射波動の遠方場近似

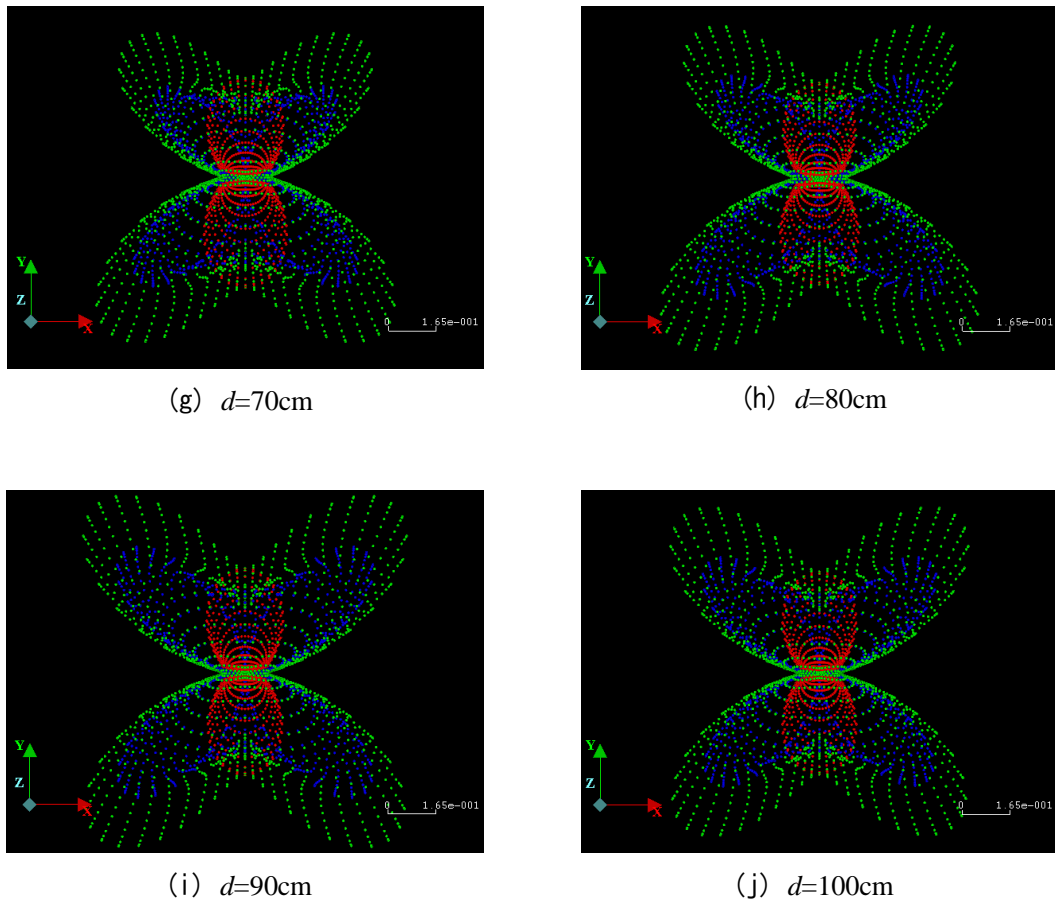


図 7.13(2) 放射波動の遠方場近似

(1)から(4)までの結果より、自由面の効果という観点で整理する。最小抵抗線長がある一定値より大きくなると、自由面による放射波動を低減する効果はほとんど見られなくなり、最小抵抗線長が大きいパターン（つまり通常の心抜き）とあまり変わらなくなる。また、最小抵抗線長が大きい場合、そもそも当該検討条件のような少量の爆薬量では効果的な破碎は実現できず、これより多量の爆薬が必要である。これらのことより、自由面による振動低減効果は、①最小抵抗線長を小さくすること、②斉発する爆薬量を低減すること、の2つを同時に実現することであると換言できる。

以上のことは、自由面による振動低減効果として既往の施工実績^{3),4)}で確認されている、 K 値および装薬量の低減効果と同意と考えられる。すなわち、①の最小抵抗線長を大幅に小さくできる効果は、同じ装薬量であっても地山側に放射される波動エネルギーを小さくすることであり、これは式(1.1)の K 値あるいは式(2.1)の C_2 を小さくする効果にほかならない。また、斉発薬量を低減できる効果は、式(1.1)の装薬量 W の低減そのものである。

一方で、自由面の効果が有効となる条件が存在することも認められた。当該検討条件において、自由面を形成することによって放射波動の大きさをコントロールできるのは、最小抵抗線長 d がおおむね $0\sim 40\text{cm}$ の範囲であった。ただし、 $d = 0\sim 10\text{cm}$ では掘削効率がきわめて低いため、現実的な d の範囲は $20\sim 40\text{cm}$ と判断できる。

7.4 第7章のまとめ

本章では、自由面発破の最小抵抗線長を $d=10\sim100\text{cm}$ と変化させたケーススタディを行い、破壊状況や各種エネルギーに着目することにより、自由面発破における振動低減効果のメカニズム解明を試みた。

まず、破壊状況や各種エネルギーについて比較した結果は以下のとおりである。

- 1) 最小抵抗線長が大きくなるに伴い破壊面積は増加するが、ある一定値より大きくなる（当該解析条件では 40cm 程度以上）と破壊面積の増加傾向が緩くなる。
- 2) 放射波動および破壊エネルギーは、最小抵抗線長が大きくなるに伴って増加するが、ある一定値より大きくなる（当該解析条件では 40cm 程度以上）と、これらのエネルギーは増加傾向が止まる。逆に、運動エネルギーは最小抵抗線長と反比例の関係を示す。
- 3) 1)および2)より、自由面発破で最小抵抗線長を小さくすることで放射波動エネルギーを低減できるが、発破掘削の効率が損なわれる。自由面発破では、掘削効率と振動低減との間にはトレードオフの関係が存在する。
- 4) 自由面の存在によって波動の放射に指向性が現れる。とくに遠方場においては、P波は自由面に沿う方向で放射波動が大きく、S波は自由面に対して約 35° 方向に放射波動が大きくなる。ただし、この指向性は最小抵抗線長の大きさに影響を受けない。
- 5) 当該検討条件では、自由面の形成によって効果的に振動を低減できるのは、最小抵抗線長がおおむね $0\sim40\text{cm}$ の範囲であり、掘削効率も考慮すれば、現実的な最小抵抗線長の範囲は $20\sim40\text{cm}$ と判断される。

また、自由面発破における振動低減のメカニズムは次のように整理することができる。

- 1) 自由面を形成することで最小抵抗線長を大幅に小さくことができ、自由面側の岩盤を最小限の爆薬量で効率的に破壊することが可能になる。
- 2) 発破によって発生したエネルギーは、自由面側の岩盤を選択的に破壊する破壊エネルギーと、破壊された岩盤を飛散させる運動エネルギーとに費やされることで、

外周に放射される波動エネルギーの比率が相対的に低減される。

- 3) 自由面側の岩盤が飛散することで反力体が無くなり，外周に放射される波動が低減される。
- 4) 放射される波動には P 波および S 波ともにそれぞれで指向性が生まれる．自由面と鉛直方向で波動の放射が小さい。

第7章の参考文献

- 1) Minchinton, A. and Lynch, P.M. : Fragmentation and heave modelling using a coupled discrete element gas flow code, *Fragblast - International Journal for Blasting and Fragmentation*, 1, pp.41-57, 1997.
- 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, Vol.13, pp.61-66, 2013 .
- 3) 本田裕夫, 萩森健治, 古川浩平, 中川浩二 : 硬岩トンネルの無発破掘削に関する研究, 土木学会論文集, No.379/VI-6, pp.55-64, 1987.
- 4) 若月和人, 木村能隆, 多田芳葉, 高橋渉 : 心抜き自由面発破による発破振動の低減効果, トンネル工学報告集, Vol.21, pp.225-232, 2011.

第8章

合理的な自由面パターンの検討

8.1 概要

第2章では、自由面発破の合理的な設計手法が確立されていないとし、この要因として自由面発破の効果メカニズムが明らかにされていないこと、そして、これを検討するため、発破による破壊と振動を評価できる数値解析手法が確立されていないことを示した。このうち、数値解析手法については、第4～5章で構築および検証した。また、自由面発破の効果メカニズムについては、第7章で明らかにした。

そこで本章では、自由面発破の合理的な設計手法の確立を目的として、自由面発破のパターン設計で設定すべき、自由面長さと最小抵抗線長に着目したケーススタディを行うことで、合理的なパターン設計のための基礎的な知見を取得する。

解析対象および条件は第7章と同じとし、自由面長 L は横畠トンネルで実施した 2.0m を中心として 1.0～3.0m と変化させ、最小抵抗線長は第7章の結果をふまえて 20～40cm と変化させて検討した。

8.2 自由面発破パターンの比較

(1) 検討ケース

検討手法は第7章で行ったケーススタディと同じとする．ここでは，自由面パターンにおいて設定すべき自由面長および最小抵抗線長に着目し，その影響について評価する．検討ケースを表8.1に示す．

表 8.1 検討ケース

		自由面長 L				
		1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m
最小抵抗線長 d	20cm	○	○	○	○	○
	30cm	○	○	○	○	○
	40cm	○	○	○	○	○

(2) モデル化

解析モデルを図8.1に示す．解析領域，境界条件および解析パラメータは，第6章および第7章と同じである．自由面長は，自由面側の拘束条件を変更することで変化させ，最小抵抗線長ごとにメッシュを変更した5ケースの解析を行なった．

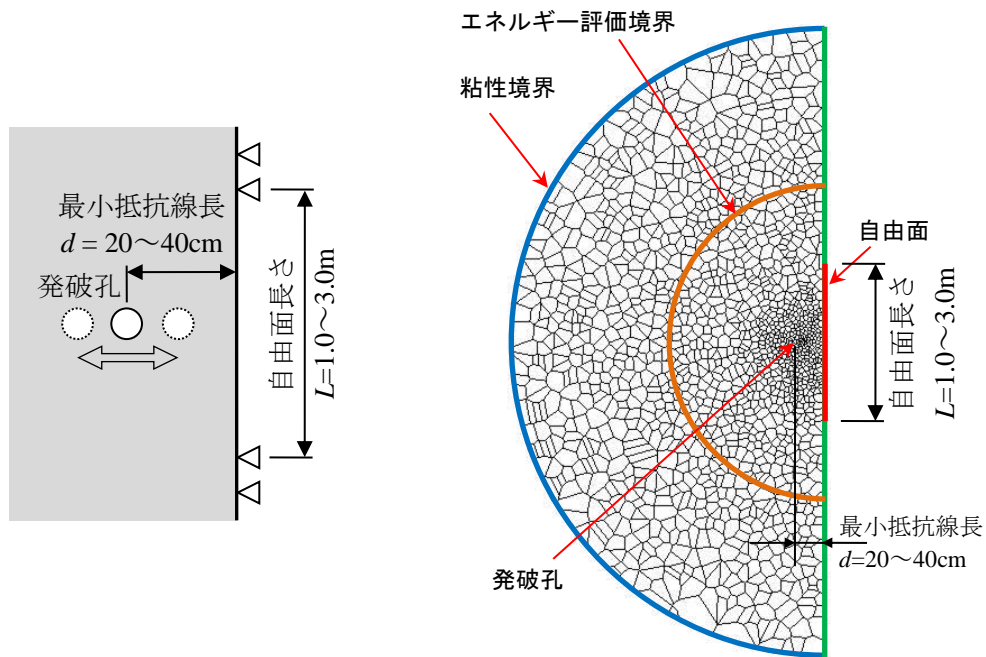


図 8.1 解析モデル

8.3 自由面長を変えた場合の解析結果

(1) 破壊状況

自由面長 L を 1.0～3.0m に変えた場合の代表的な破壊状況を図 8.2～8.4 に示す。前章までと同様に $t=0.02s$ 時点の状況を示す。

最小抵抗線長 d が大きくなるほど、破壊片の飛散が小さくなるが、破壊領域が拡大する傾向が見られる。これは前章の解析結果と同様である。ここでは、自由面長の影響について評価するため、自由面長と自由面側の破壊領域の関係に着目する。

いずれの最小抵抗線長においても、自由面長 L を長くするに伴って破壊領域は拡大する傾向にある。ただし、 L がある一定長さより長くなっても破壊領域は拡大しないようである。 $d=20cm$ の場合、 $L=1.0\sim1.5m$ では破壊領域は自由面長よりやや狭い範囲にとどまっており、破壊領域は自由面長で制限されているようであるが、 $L=2.0m$ 以上では破壊領域に対して自由面長は十分に長いように見受けられる。 $d=30cm$ の場合も $d=20cm$ の場合と同様であるが、 $L=2.0m$ 以上での破壊領域は $d=20cm$ の場合よりも広がっている。

$d=40cm$ の場合、 $L=1.0\sim1.5m$ では $d=20\sim30cm$ と同様の傾向であるが、 $L=2.0\sim3.0m$ であっても自由面の端部にまで亀裂が発生しており、破壊領域が自由面長で制限されている可能性がある。

自由面側の破壊領域はクレーター状となることから、最小抵抗線長が長くなるほど破壊領域が拡大しようとするため、これを拘束させずに破壊させるためにはより長い自由面が必要になるのは当然の傾向と言える。

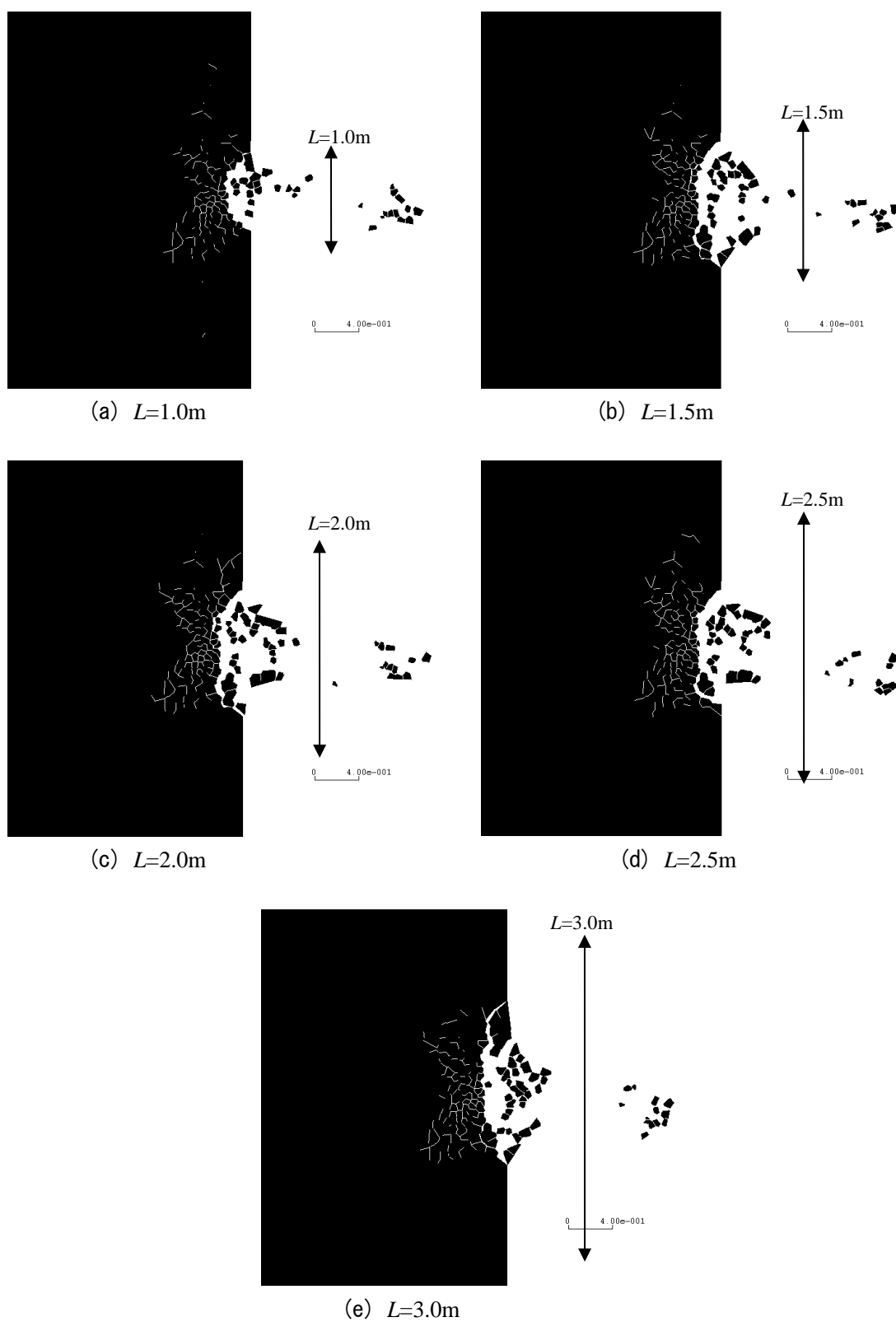


図 8.2 自由面長を変えた場合の破壊状況 ($d=20\text{cm}$, $t=0.02\text{s}$)

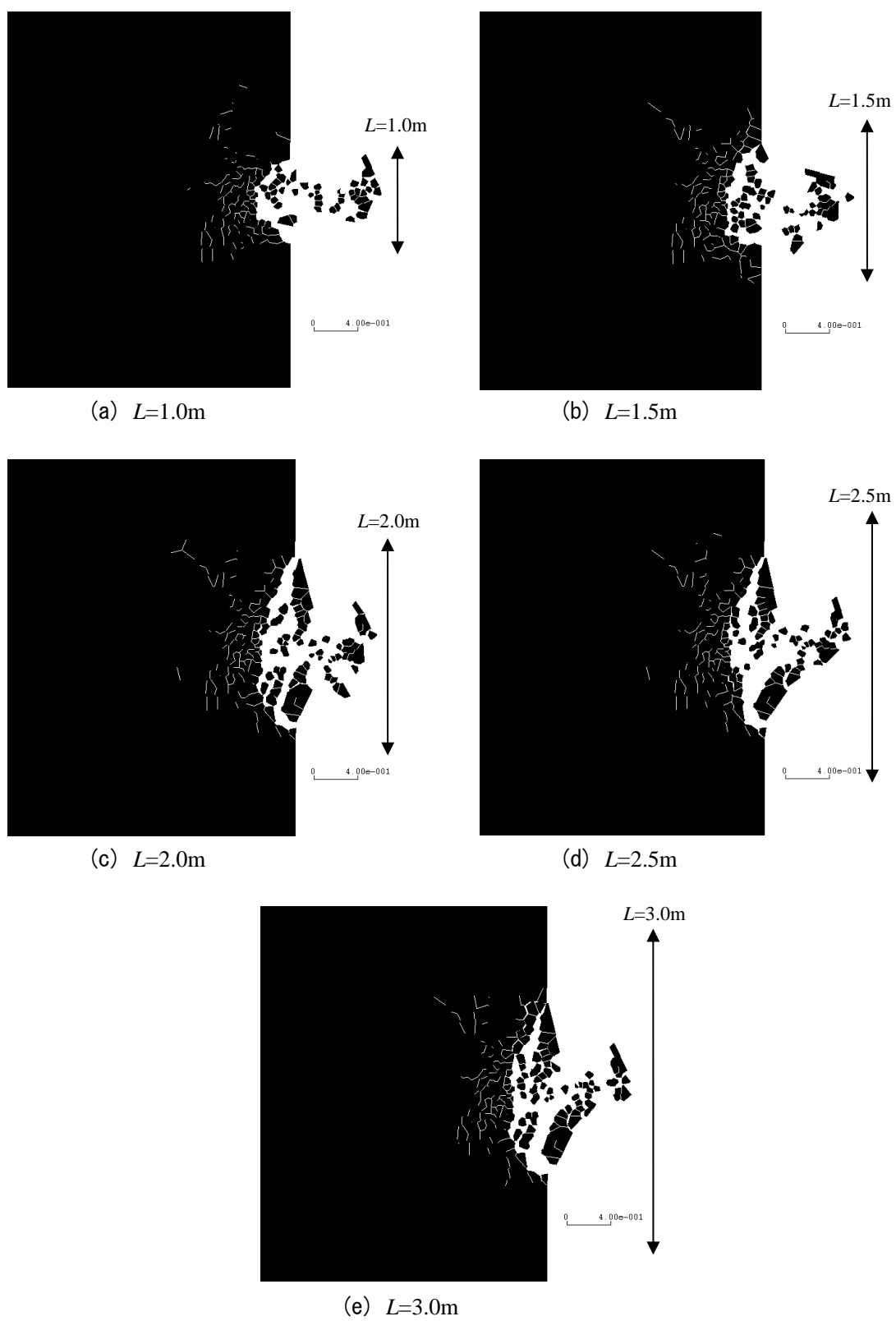


図 8.3 自由面長を変えた場合の破壊状況 ($d=30\text{cm}$, $t=0.02\text{s}$)

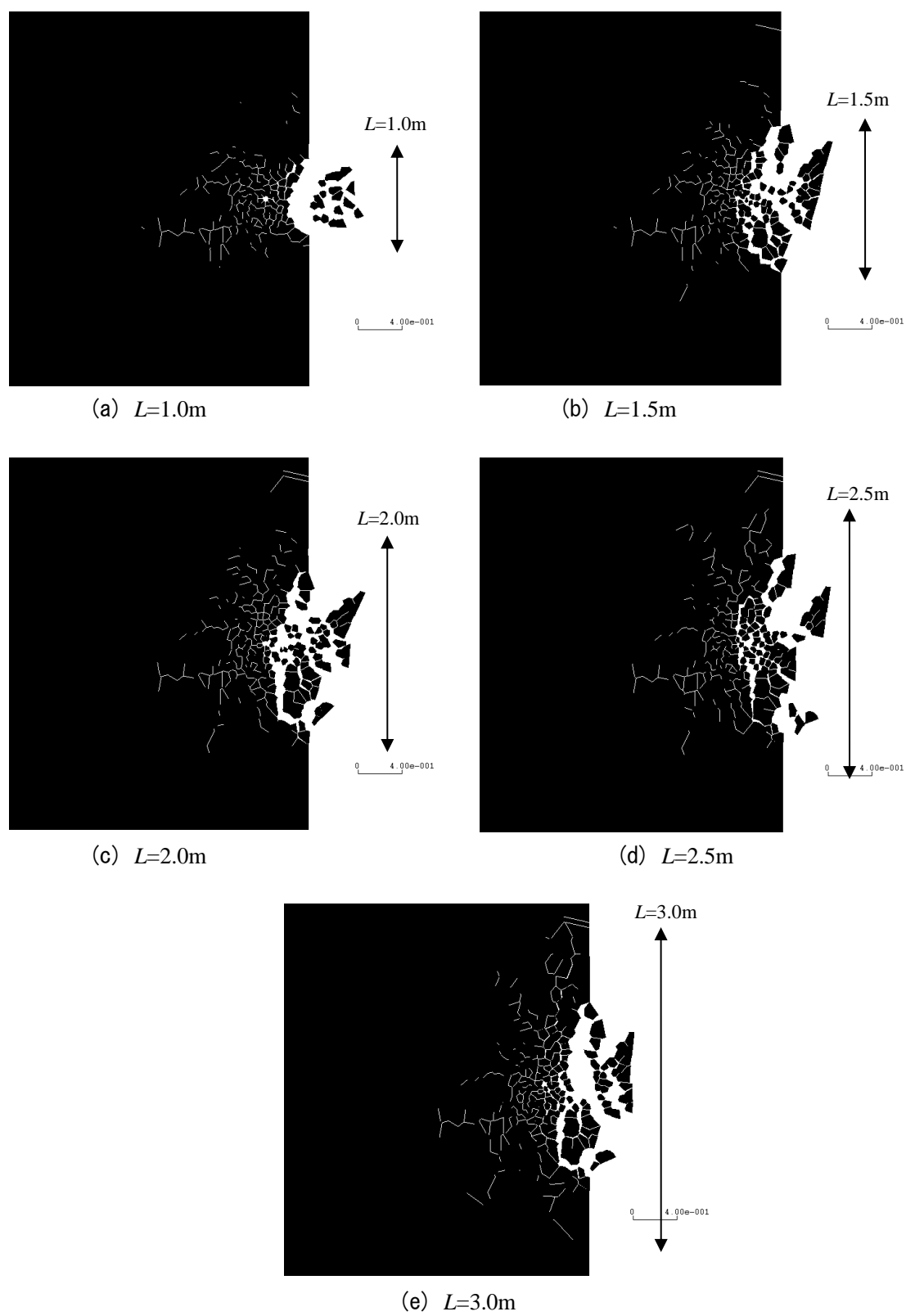


図 8.4 自由面長を変えた場合の破壊状況 ($d=40\text{cm}$, $t=0.02\text{s}$)

このときの破壊面積を表 8.2 および図 8.5 に示す。

表 8.2 自由面長を変えた場合の破壊面積 ($t=0.02s$)

			自由面長 L				
			1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m
最小抵抗線長 d	20cm	破壊面積(m^2)	0.71	0.83	0.91	0.91	0.91
		(標準偏差)	0.07	0.06	0.06	0.05	0.10
	30cm	破壊面積(m^2)	0.84	0.95	1.11	1.21	1.23
		(標準偏差)	0.07	0.12	0.10	0.09	0.10
	40cm	破壊面積(m^2)	1.23	1.36	1.55	1.63	1.78
		(標準偏差)	0.26	0.28	0.25	0.25	0.34

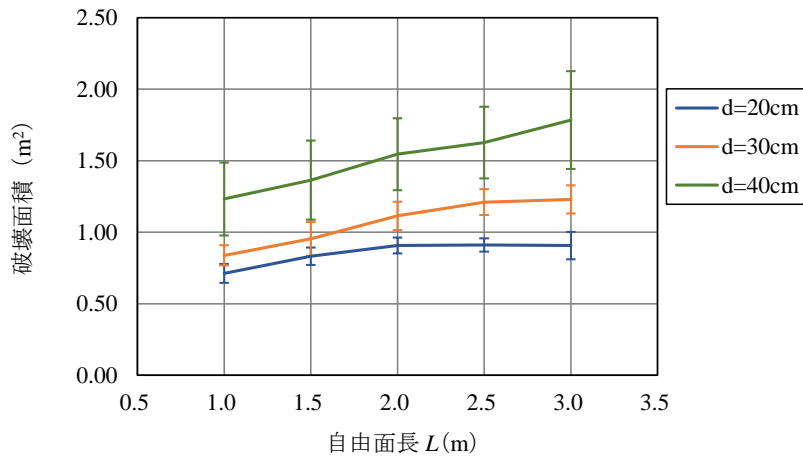


図 8.5 自由面長を変えた場合の破壊面積 ($t=0.02s$)

最小抵抗線長 d が大きくなるとともに破壊面積が大きくなる傾向は第 7 章の結果と同じであるが、これとともに自由面長 L が長くなることによっても破壊面積は増加する傾向にある。これは、前述したとおり、 L が長いほど拘束のない境界条件の範囲が広く、容易に破壊に至るため当然の結果と言える。ただし、 $d=20cm$ の場合はおおむね $L=2.0m$ あたりから、 $d=30cm$ の場合はおおむね $L=2.5m$ あたりから、破壊面積の増加傾向が緩くなっている。自由面発破での破壊形態は、自由面側でのクレーター状の破壊領域となることから、自由面長を一定の長さ以上に長くしても破壊面積に影響を与えなくなることは当然のことと言える (図 8.6)。

以上のように、掘削効率の観点で言えば、自由面長は長いほど効率的であり、最小抵抗線長が大きくなるほど自由面長を長くする必要がある。逆に、最小抵抗線長が小さい場合は自由面長を長くする効果は低い。

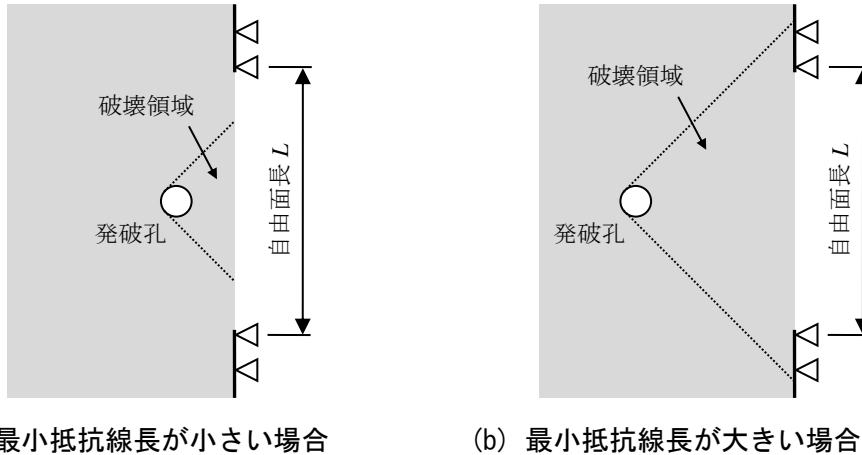


図 8.6 自由面長が破壊面積に与える影響イメージ

(2) 各種エネルギー

自由面長を変えた場合の各種エネルギーを表 8.3～8.5 および図 8.7 に示す。ここでは、5 ケースの解析結果の平均値を示した。

放射波動エネルギー（図 8.7(a)）は、最小抵抗線長 d が大きくなるとともに増加し、同時に自由面長 L が長くなるに伴って減少する傾向にある。ただし、 d が小さい範囲（ここでは $d=20\text{cm}$ ）ではほぼ横ばいと言える。 d が大きくなることで L の影響を受けるようになると見られるが、 $d=30\text{cm}$ では変化は僅かである。 $d=40\text{cm}$ で、 L の延長に伴うやや顕著な減少傾向が見られるが、それでもおおむね $L=2.0\text{m}$ 以上で横ばいとなっている。

破壊エネルギー（図 8.7(b)）の傾向は、図 8.5 と同様の傾向を示している。破壊エネルギーは破壊面積と相関性が高いと考えれば当然の結果と言える。

放射波動エネルギーおよび破壊エネルギーの傾向より、最小抵抗線長の大きさに対して自由面長が短い場合、自由面側の破壊が抑制されることで破壊に費やされるエネルギーが低減され、代わりに放射波動エネルギーが増加しているものと推測される。ただし、 $d=20\sim 40\text{cm}$ の範囲では、自由面長 $L=1.0\sim 3.0\text{m}$ は放射波動エネルギーの低減に対して比較的長く、その影響が小さいものと考えられる。

運動エネルギー（図 8.7(c)）については、 d の増加に伴って減少すること以外、 d が小さな場合（ここでは $d=20\text{cm}$ ）にやや L の影響を受けているように見える程度で、他に明瞭な傾向は見られず、ほとんど L の長さに影響を受けていないようである。放射波動エネルギーと同様に、 $d=20\sim 40\text{cm}$ の範囲では、運動エネルギーに対して $L=1.0\sim 3.0\text{m}$ は十分に長いために影響が小さいと考えられる。

以上のように、 $d=20\sim 40\text{cm}$ の範囲に限定すれば、自由面長は長いほど掘削効率および振動低減の観点から有利とも言えるが、放射波動エネルギーに対する寄与が非常に小さいため、振動低減の観点のみに限定すれば自由面長は必要以上に長くする必要はない。最小抵抗線長にもよるが、 $L=1\sim 2\text{m}$ 程度で十分と考えられる。ただし、破壊エネルギーに対する影響は認められることから、掘削の効率性もある程度考慮する場合には、 $L=2\sim 3\text{m}$ 程度に長くすることも選択肢になるであろう。

表 8.3 自由面長を変えた場合の各種エネルギー（ $d=20\text{cm}$ ）

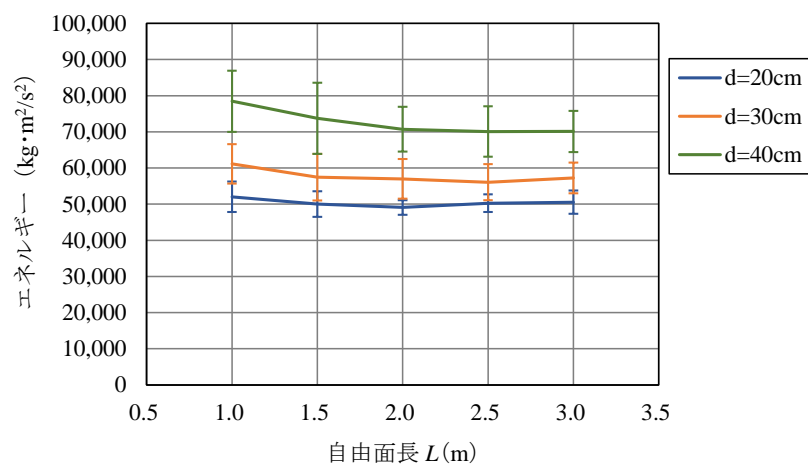
			自由面長 (m)				
			1	1.5	2	2.5	3
各種エネルギー ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$)	①	入力エネルギー	1,303,735	1,307,943	1,310,927	1,307,616	1,303,417
	②	放射エネルギー	52,028	50,039	49,079	50,272	50,559
	③	破壊エネルギー	6,591	8,428	8,941	9,120	9,048
	④	運動エネルギー	321,966	319,961	332,536	327,660	326,435
	⑤	ひずみ + 減衰 ① - (②+③+④)	923,151	929,514	920,371	920,564	917,374
エネルギー比率 (%)	⑥	放射+運動+破壊 (②+③+④) / ①	29.2	28.9	29.8	29.6	29.6
	⑦	ひずみ+減衰 ⑤ / ①	70.8	71.1	70.2	70.4	70.4
エネルギー比率 (%)	⑧	放射エネルギー ② / (②+③+④)	14.0	13.4	12.6	13.0	13.6
	⑨	破壊エネルギー ③ / (②+③+④)	1.8	2.2	2.2	2.6	2.2
	⑩	運動エネルギー ④ / (②+③+④)	84.2	84.4	84.8	84.6	84.2

表 8.4 自由面長を変えた場合の各種エネルギー ($d=30\text{cm}$)

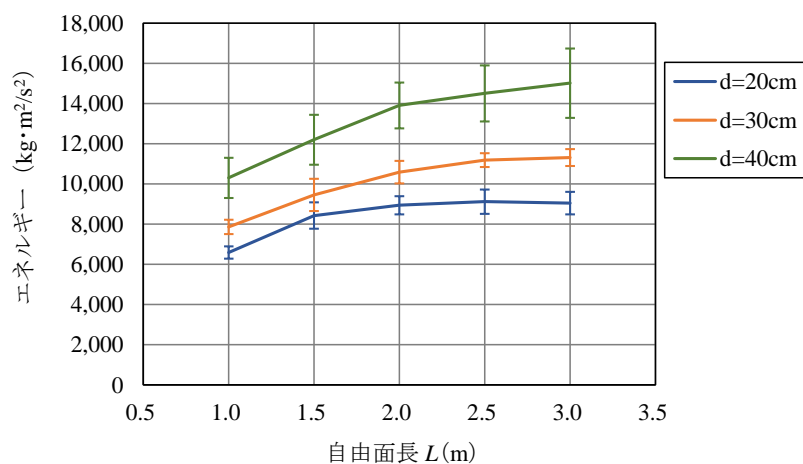
			自由面長 (m)				
			1	1.5	2	2.5	3
各種エネルギー ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$)	①	入力エネルギー	1,104,689	1,113,902	1,112,343	1,109,667	1,111,662
	②	放射エネルギー	61,118	57,467	57,000	56,063	57,248
	③	破壊エネルギー	7,866	9,460	10,588	11,187	11,317
	④	運動エネルギー	127,449	149,114	142,062	146,933	142,861
	⑤	ひずみ + 減衰 ① - (②+③+④)	908,257	897,861	902,694	895,485	900,235
エネルギー 比率 (%)	⑥	放射+運動+破壊 (②+③+④) / ①	17.8	19.4	18.8	19.3	19.0
	⑦	ひずみ+減衰 ⑤ / ①	82.2	80.6	81.2	80.7	81.0
エネルギー比率 (%)	⑧	放射エネルギー ② / (②+③+④)	31.6	26.8	27.0	26.2	27.0
	⑨	破壊エネルギー ③ / (②+③+④)	4.0	4.4	5.2	5.2	5.4
	⑩	運動エネルギー ④ / (②+③+④)	64.4	68.6	67.6	68.4	67.4

表 8.5 自由面長を変えた場合の各種エネルギー ($d=40\text{cm}$)

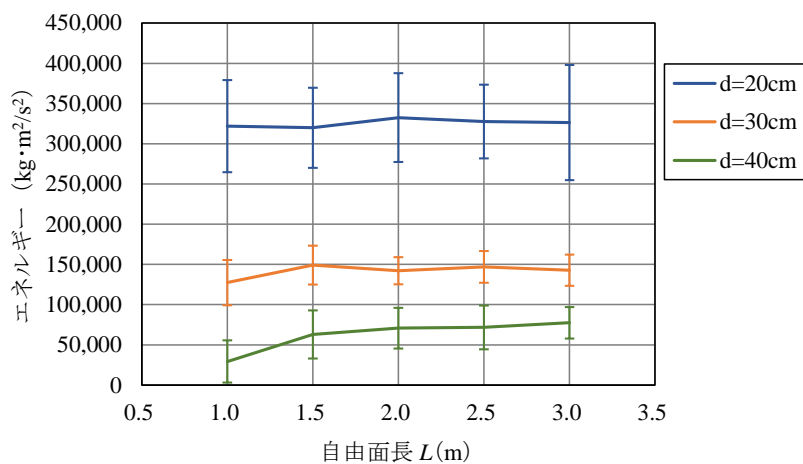
			自由面長 (m)				
			1	1.5	2	2.5	3
各種エネルギー ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$)	①	入力エネルギー	1,115,250	1,136,476	1,137,928	1,136,922	1,141,900
	②	放射エネルギー	78,462	73,747	70,738	70,079	70,114
	③	破壊エネルギー	10,305	12,202	13,910	14,507	15,017
	④	運動エネルギー	29,206	62,927	70,757	71,703	77,484
	⑤	ひずみ + 減衰 ① - (②+③+④)	997,277	987,600	982,522	980,633	979,286
エネルギー 比率 (%)	⑥	放射+運動+破壊 (②+③+④) / ①	10.6	13.1	13.7	13.7	14.2
	⑦	ひずみ+減衰 ⑤ / ①	89.4	86.9	86.3	86.3	85.8
エネルギー比率 (%)	⑧	放射エネルギー ② / (②+③+④)	69.6	51.4	46.4	46.0	43.6
	⑨	破壊エネルギー ③ / (②+③+④)	9.2	8.4	9.2	9.8	9.2
	⑩	運動エネルギー ④ / (②+③+④)	21.4	40.2	44.2	44.4	46.8



(a) 放射波動エネルギー



(b) 破壊エネルギー



(c) 運動エネルギー

図 8.7 自由面長を変えた場合の各種エネルギー

自由面長を変えた場合の、入力エネルギーに対する「放射波動＋運動＋破壊」エネルギーの比率と「ひずみ＋減衰」エネルギーの比率を図 8.8 に示す。いずれの自由面長においても、入力エネルギーの多くが「ひずみ＋減衰」エネルギーに費やされていること、最小抵抗線長 d の増加とともに「放射波動＋運動＋破壊」エネルギーの比率が低下し、「ひずみ＋減衰」エネルギーの比率が高くなる傾向にあることは共通している。しかしながら、自由面長が変化しても比率の変動はわずかであり、影響はほとんど見受けられない。

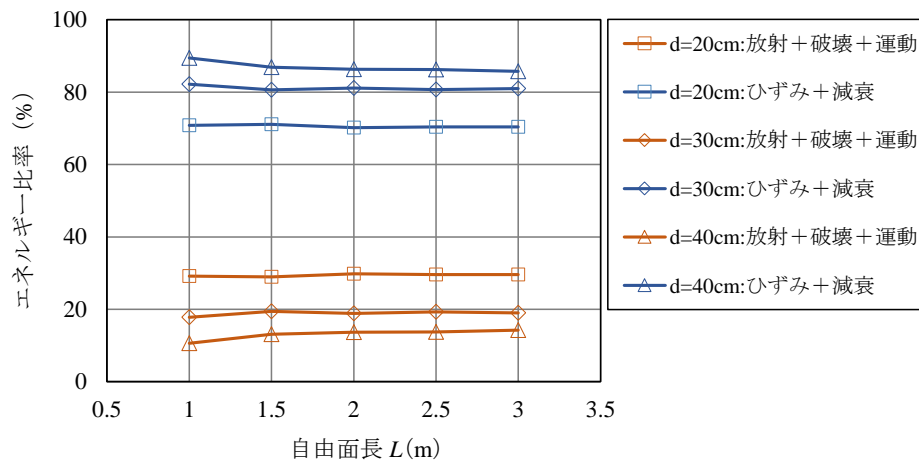


図 8.8 自由面長を変えた場合のエネルギー比率(1)

「放射波動＋運動＋破壊」における各エネルギーの比率を図 8.9 に示す。いずれのケースにおいても破壊エネルギーの占める比率はきわめて低い。また、最小抵抗線長 d が 20～30cm と比較的小さい場合においては、いずれのエネルギーの比率に対しても L の影響は小さい。 $d=40\text{cm}$ の場合、 L が長くなるほど運動エネルギーの比率が増加し、放射波動エネルギーの比率が減少する傾向がある。ただし、この場合でも $L=2.0\text{m}$ 以上では各エネルギー比率は変動しなくなっている。

以上のことより、最小抵抗線長が 20～30cm と小さい場合、効率的な振動低減の観点から自由面長は 1.0m 程度で十分であり、必要以上に長くする必要はない。最小抵抗線長を 40cm とやや大きくした場合、自由面長を長くすることで効率的に振動低減を図ることができるが、それでも $L=2.0\text{m}$ 程度で十分と判断できる。

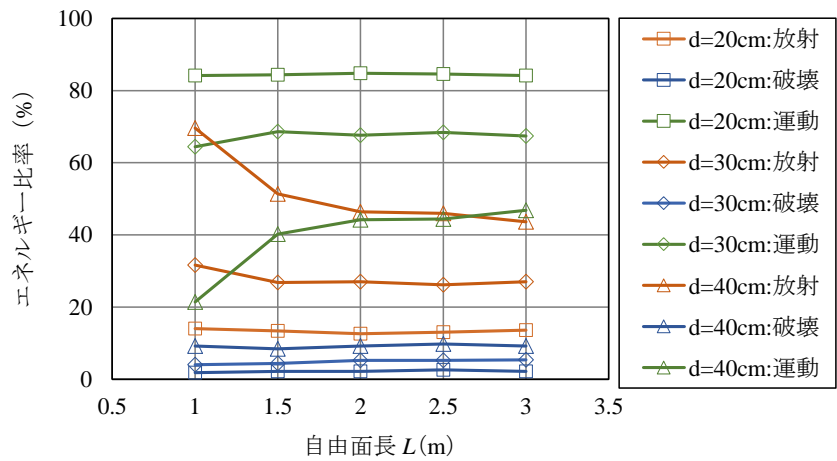


図 8.9 自由面長を変えた場合のエネルギー比率 (2)

自由面長を変えた場合の放射波動の指向性を調べるため、放射波動エネルギーの放射特性を図 8.10～8.11 に示す。

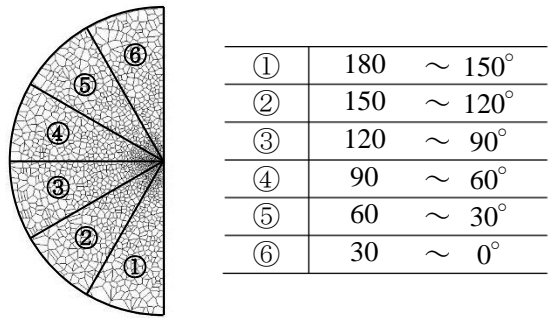


図 8.10 放射波動エネルギーの放射方向区分

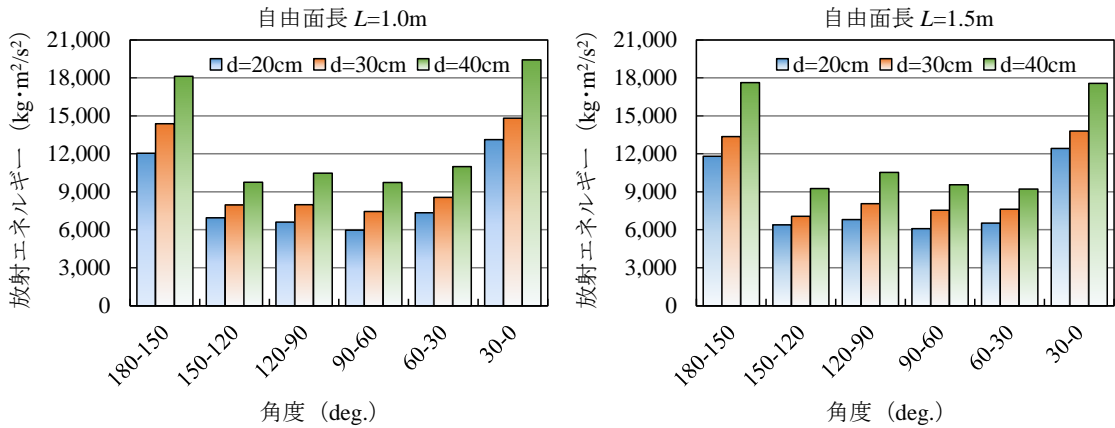


図 8.11 (1) 自由面長を変えた場合の放射波動エネルギーの分布

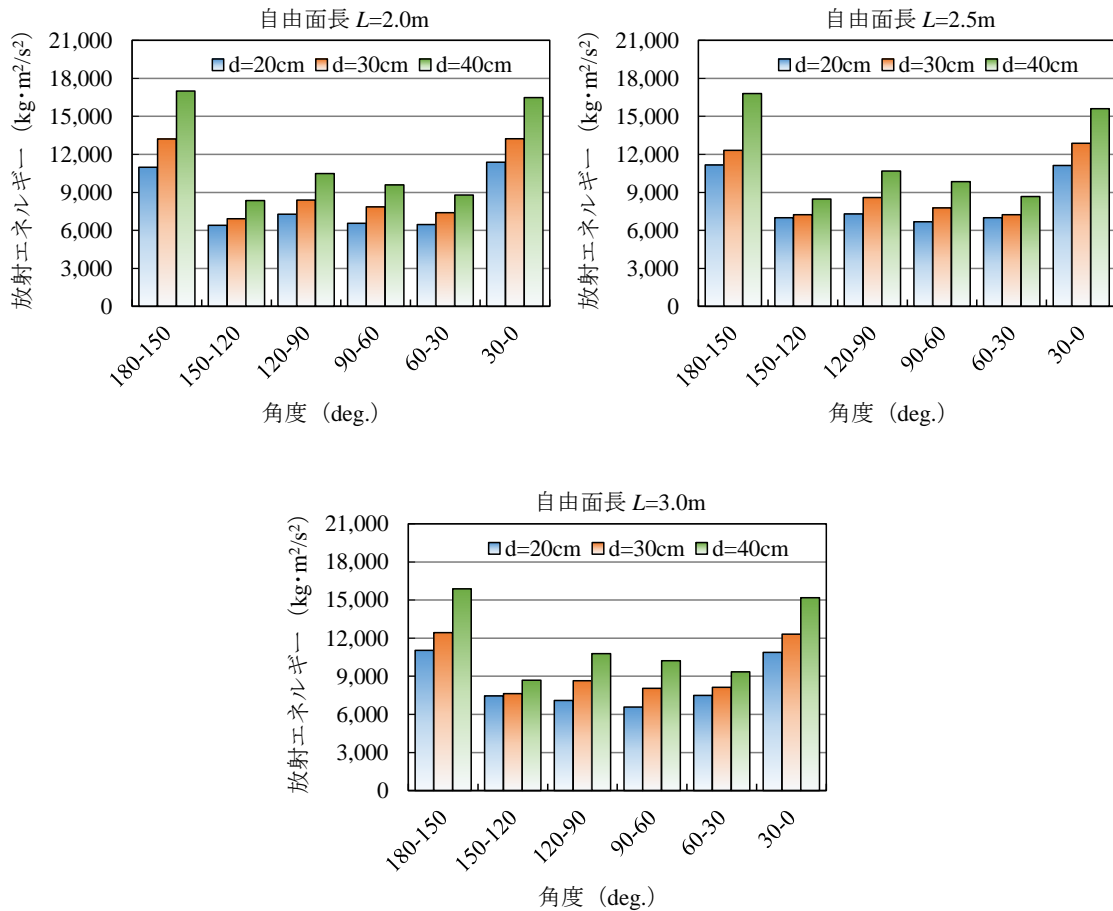


図 8.11 (2) 自由面長を変えた場合の放射波動エネルギーの分布

いずれのケースでも、自由面と平行方向で放射波動エネルギーが大きく、自由面と鉛直方向で比較的小さくなっており、自由面の存在によって放射波動に方向性が生まれている。また、自由面長 L が長くなるに伴って放射波動エネルギーが全体的に減少している。 $L=3.0\text{m}$ の場合は $L=1.0\text{m}$ と比較して、自由面と平行方向では約 10～20% 低減しているのに対し、自由面と鉛直方向では顕著な変動は見られない。自由面長を長くすることで、放射波動の指向性が弱くなっているとも言えるが、全体の傾向の中では小さな動きである。

以上の結果から、放射波動の指向性に対して自由面長を変えることの影響は小さいと判断できる。

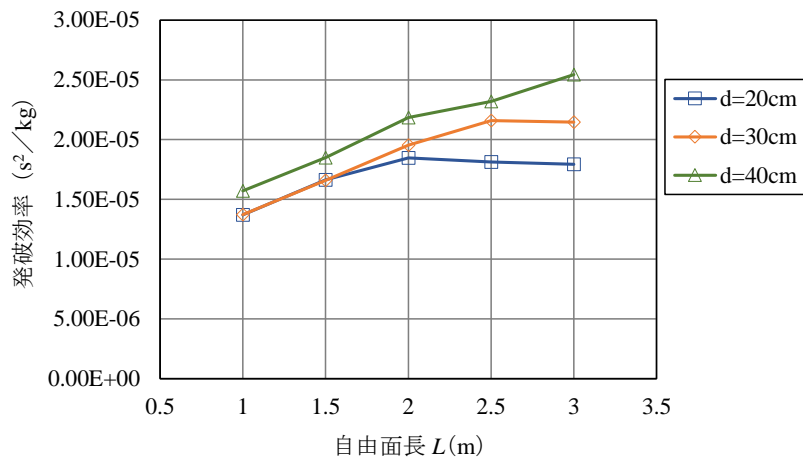
(3) 発破効率

式(7.4)に示した発破効率 e_B と自由面長 L の関係を表 8.6 および図 8.11 に示す。自由面長が放射波動エネルギーに与える影響はあまり大きくないため、図 8.11 は、図 8.5 の破壊面積および図 8.7 (b) の破壊エネルギーと同様の傾向を示している。すなわち、自由面長 L の増加とともに右肩上がりで増加している発破効率の傾向は、ほとんどが破壊エネルギーによるものである。

自由面長を長くすることによる振動低減の効果はあまり高くないが、掘削の効率性を高めるためには、自由面長は長いほど効果的である。ただし、ある一定の長さ以上にしても効率は向上しなくなる。当該解析条件においては、最小抵抗線長 $d=20\text{cm}$ では自由面長 $L=2.0\text{m}$ 程度、 $d=30\text{cm}$ では $L=2.5\text{m}$ 程度が自由面長の上限と判断される。 $d=40\text{cm}$ の場合、当該解析結果で発破効率の変化点は見られないが、 $d=20\sim30\text{cm}$ の傾向より、 $L=3.0\text{m}$ 程度が自由面長の上限と判断される。

表 8.6 発破効率 e_B ($\times 10^{-5}$ (s^2/kg))

		自由面長 L				
		1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m
最小抵抗線長 d	20cm	1.37	1.66	1.85	1.81	1.79
	30cm	1.37	1.66	1.95	2.16	2.15
	40cm	1.57	1.85	2.18	2.32	2.54

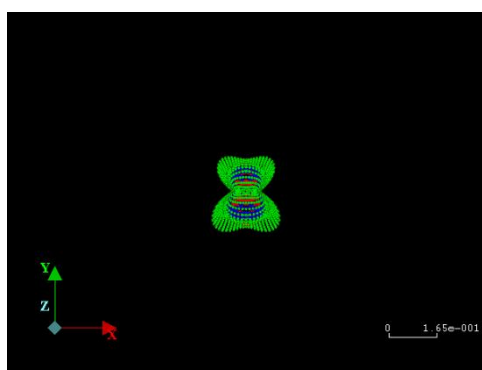
図 8.11 発破効率 e_B

(4) 放射波動の遠方場近似

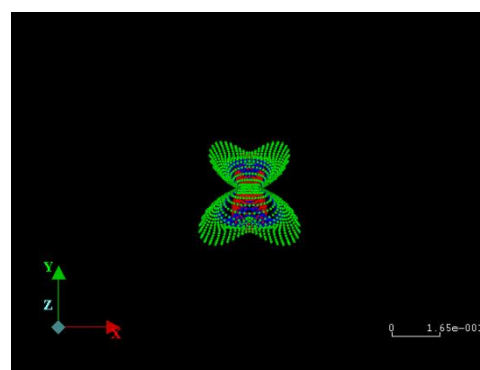
放射波動の遠方場における平均パワーを図 8.12～8.14 に示す. 最小抵抗線長 d および自由面長 L を変えて, それぞれ 5 ケース算出した放射波動エネルギーの平均値に遠方場近似を適用した結果であり, 200Hz 成分を示した. 赤のプロットは P 波を, 青のプロットは S 波を, 緑のプロットは P 波と S 波の合成を示す.

自由面に対しておおよそ 35° 方向に S 波が卓越する傾向はいずれのケースでも共通しているが, 自由面長が $L=1.0\sim 1.5\text{m}$ 程度と短い場合, この S 波の卓越傾向が比較的小さいように見受けられる. 逆に, L がこれより長くなるほど S 波の卓越が顕著となっている.

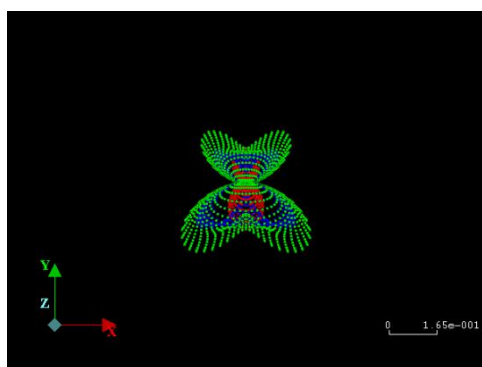
(2) で示した発破孔近傍における放射波動エネルギーの指向性は, 自由面長にあまり影響を受けていないが, 上述の結果はこの結果と異なっている. 6.5 では境界要素法および理論解を用いることで, 自由面の存在によって S 波が発生することを確認し, 自由面長を長くすることで S 波の指向性が卓越することを推測したが, 当該解析結果においてもその傾向が確認された. 遠方場においては, S 波に対して P 波の減衰が大きいいため, S 波の指向性がより強調されたためと推測される.



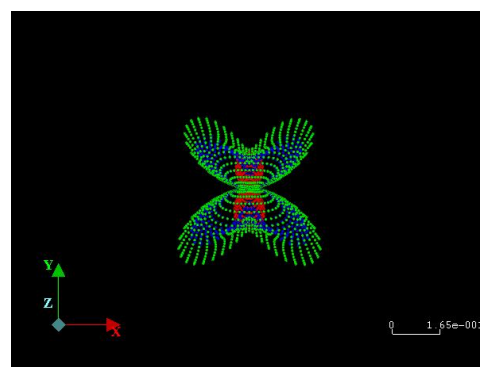
(a) $L=1.0\text{m}$



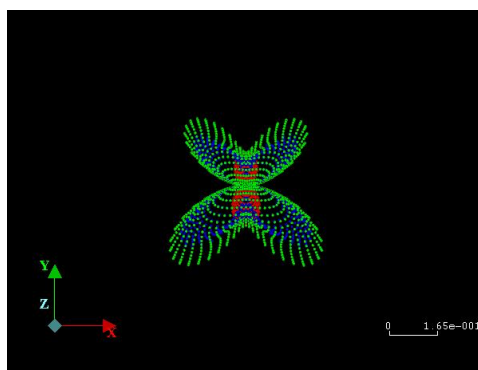
(b) $L=1.5\text{m}$



(c) $L=2.0\text{m}$

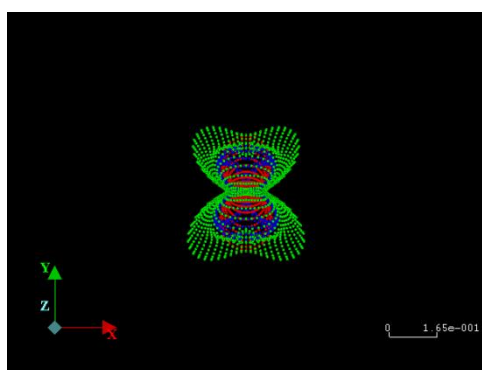


(d) $L=2.5\text{m}$

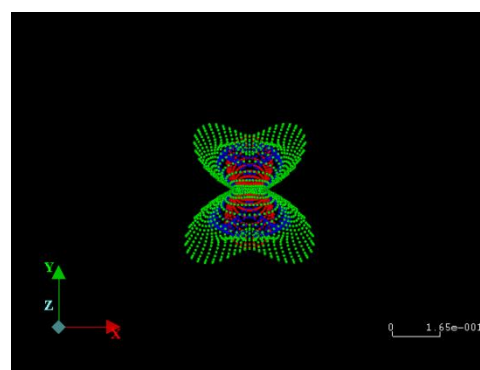


(e) $L=3.0\text{m}$

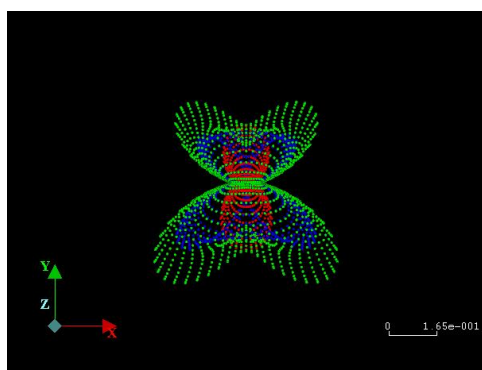
図 8.12 放射波動の遠方場近似 ($d=20\text{cm}$)



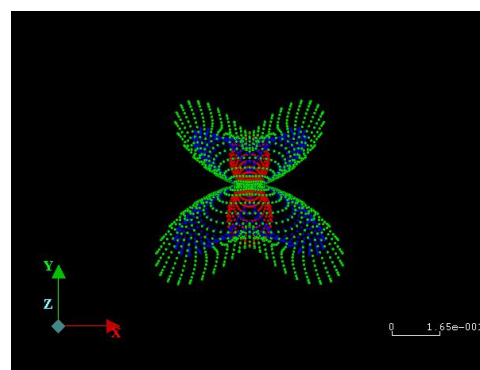
(a) $L=1.0\text{m}$



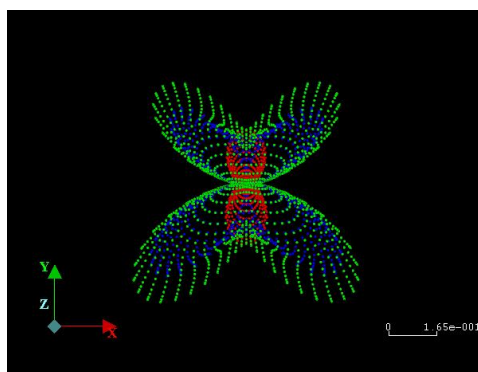
(b) $L=1.5\text{m}$



(c) $L=2.0\text{m}$

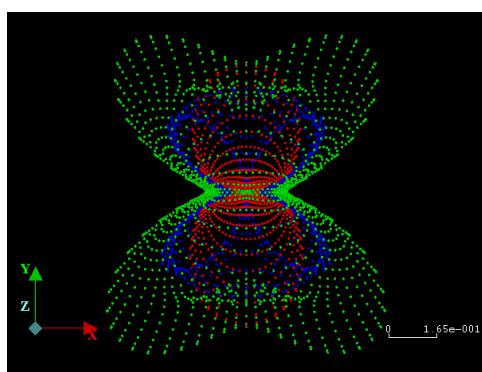


(d) $L=2.5\text{m}$

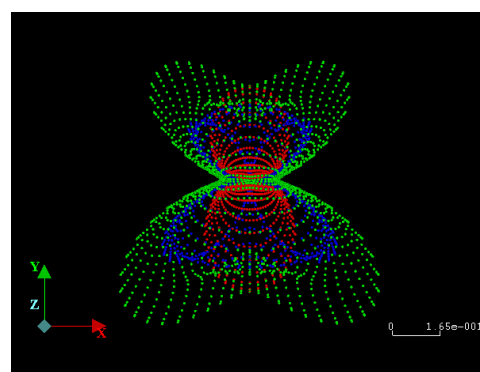


(e) $L=3.0\text{m}$

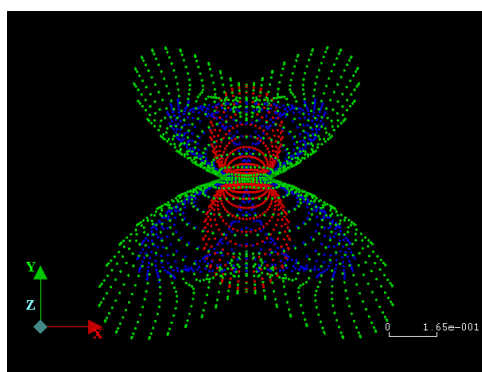
図 8.13 放射波動の遠方場近似 ($d=30\text{cm}$)



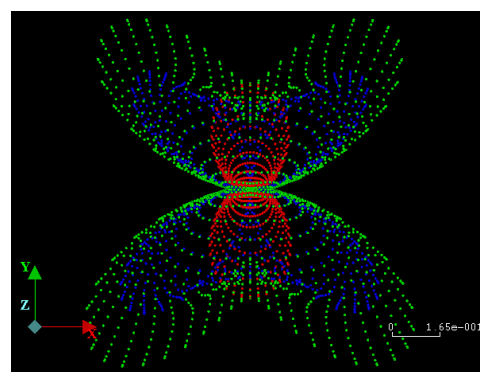
(a) $L=1.0\text{m}$



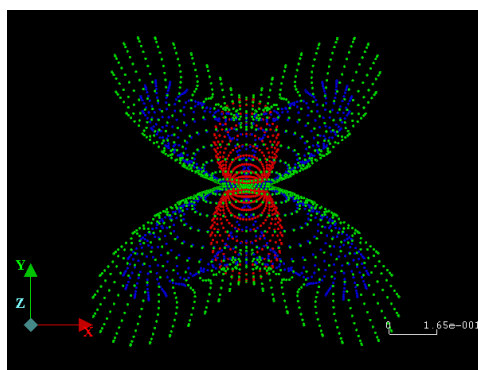
(b) $L=1.5\text{m}$



(c) $L=2.0\text{m}$



(d) $L=2.5\text{m}$



(e) $L=3.0\text{m}$

図 8.14 放射波動の遠方場近似 ($d=40\text{cm}$)

8.4 第8章のまとめ

本章では、合理的な自由面発破パターンの設計を目的として、最小抵抗線長と自由面長を変化させたケーススタディを行い、自由面発破パターンの違いが破壊状況や各種エネルギーに与える影響について検討した。

現実的な最小抵抗線長として $d=20\sim40\text{cm}$ とし、自由面の長さを $L=1.0\sim3.0\text{m}$ と変化させた解析により以下の成果を得た。

- 1) 掘削効率の観点からは、自由面長は長いほど効率的であり、最小抵抗線長が大きいほど自由面長を長くする効果が高い。ただし、この効果には上限もあり、最小抵抗線長 $d=20\text{cm}$ では自由面長 $L=2.0\text{m}$ 以上、 $d=30\text{cm}$ では $L=2.5\text{m}$ 以上に自由面を長くしても掘削効率は向上しない。
- 2) 放射波動エネルギーに対する自由面長の影響は非常に小さいため、振動低減の目的のみであれば自由面長はあまり長くする必要はなく、最小抵抗線長に応じて $L=1.0\sim2.0\text{m}$ 程度で十分である。1)に示した掘削の効率性も考慮し、 $L=2.0\sim3.0\text{m}$ 程度を上限として自由面長を設定する。
- 3) 自由面を形成することで、発破孔近傍における放射波動エネルギーは、自由面と平行方向が大きくなり、自由面と鉛直方向で小さくなるという指向性が生まれるが、この指向性は自由面の長さにあまり影響を受けない。
- 4) ただし、自由面を長くすることで、距離減衰の小さな S 波が指向性を持って発生するため、遠方場では、自由面長を長くすることで S 波が卓越する

本研究では、以上の結果を整理することで、最小抵抗線長に応じた適切な自由面長 L の目安を表 8.7 のように提案する。なお、自由面長を長くすることで方向性の顕著な S 波が強く発生するようになるため、対象物件との位置関係にも配慮する必要があり、さらに、必要とする破壊領域を確保できる範囲で自由面長を短くすることが振動低減にとって効果的である。

ただし、この目安は等方均質な地山条件を想定して提案したものであり、地山条件が異なる場合はこの限りではない可能性がある。実際の地山条件は千差万別であり、このすべてに対して同様の検討を行なうことは現実的でないため、理想的な条件のもとでの目安を

提案したものである。適用にあたっては、実際の地山条件との違いを加味して修正するなどの対応が必要となることも考えられる。

表 8.7 適切な自由面発破パターンの目安

		振動低減のための 最小限の自由面長 L	掘削効率も考慮した 自由面長の上限 L
最小抵抗線長 d	20cm	1.0m	2.0m
	30cm	1.0m	2.5m
	40cm	2.0m	3.0m

※自由面長を長くすることで指向性を持った S 波が卓越するため、自由面を形成する際の方向に注意が必要である。

第9章

結 論

9.1 本研究のまとめ

本研究では、発破振動の低減が求められるケースが増えてきている現状において、おもに心抜きに伴う振動低減を目的とした自由面発破(心抜き自由面発破と呼ぶ)を対象とし、自由面を含む発破パターンを合理的に設計することを主目的としている。

研究にあたっては、自由面発破の実挙動を明らかにするため、自由面発破を模擬した発破実験を実施し、自由面発破の破壊と振動伝搬の挙動を把握した。さらに、この結果をふまえて構築した数値解析手法を適用し、自由面発破における振動低減メカニズムを明らかにした。さらに、発破パターンを変えたケーススタディにより、合理的な自由面発破パターンの設計を行なうための知見を得た。

本研究から得られた結論を各章ごとにまとめて以下に示す。

第1章「緒論」では、山岳トンネルで多く採用されている発破掘削方式において、発破振動の低減が求められる現状、自由面発破の置かれている現状の現状について記述したうえで、本研究の目的や必要性、さらに本論文の構成を示した。

とくに、割岩工法と比較して効率的かつ経済的な自由面発破の採用実績が、割岩工法と比較して大幅に少ない現状について、認知度が低いことや、標準的な発破パターン設計の考え方が存在していないことを挙げ、本研究の意義について述べた。

第2章「自由面発破工法の現状と課題」では、論文や専門誌等で発表された自由面発破の施工事例を収集し、他の掘削方式と比較した際の特質、自由面発破工法の種類や考え方、および現状における問題点について整理した。

本章で明らかにした事項は以下のとおりである。

- 1) 既往の施工事例では、様々な自由面形成パターンが採用され、いずれの事例においても高い振動低減効果が確認されている。

- 2) 自由面を形成する位置や規模に応じて振動低減効果の高さはおおむね、心抜き部スロット < 外周スロット < 外周+心抜き部スロットと考えられる。
- 3) 既往の報告は、発破振動の計測結果を整理した報告がほとんどであり、自由面による振動低減のメカニズムに関する考察は見あたらない。
- 4) 施工条件と自由面形成パターンとの間に関連性は認められず、自由面形成パターンの採用過程も明確でないことを確認した。

このため、既往の事例を整理するだけでは、どのような自由面発破パターンを採用すれば最適か、すなわち自由面発破の合理的な設計を行なうことができていない現状を示した。

第3章「発破問題に対する数値解析手法の現状と課題」では、発破問題に適用した数値解析手法に関する論文を収集し、自由面発破への適用性や現状での課題について整理した。本章で示した事項は以下のとおりである。

- 1) 連続体解析は、発破直後の亀裂進展過程や振動特性の把握には有効であるが、破壊挙動を表現できないため、自由面による振動低減効果を表現することは困難である。
- 2) 不連続体解析は、破壊挙動のシミュレーションには有効であるが、振動に着目した研究事例はほとんどない。また、発破後の動的破壊とそれに伴う振動の両者を取り扱った事例は見あたらない。
- 3) 発破の数値解析において重要な入力パラメータであるガス圧は、解析結果に大きな影響を与えるにもかかわらず不明確な点が多い。

自由面発破による振動低減効果を検討するためには、動的破壊とそれに伴って発生する振動とを適切に評価できる数値解析手法が必要と考えられるが、このような解析手法が現存しないことを示した。

第4章「自由面発破に関する数値解析手法の構築」では、数値解析手法として個別要素法を適用し、自由面発破における振動低減効果を解明するツールとしての解析手法を構築した。

発破によって発生したエネルギーのうち、破壊に費やされなかった余剰エネルギーの一部が弾性波となって発破振動になると考えられることから、発破孔近傍のエネルギー収支として、発破孔壁に投入されるエネルギー、岩盤の破壊に費やされる破壊エネルギー、破壊された岩塊を飛散させる運動エネルギー、および破壊に費やされず周辺の岩盤に放出さ

れる放射波動エネルギーを算出できる解析モデルとした。

第5章「自由面発破の実験と再現解析」では、第4章で構築した解析手法を適用するにあたってその妥当性検証が必要であり、このためには自由面発破の実挙動として、破壊挙動および波動伝搬傾向を明らかにすることが不可欠であることから、コンクリート試験体を用いて自由面発破を模擬した発破実験を実施した。さらに、その結果を用いた再現解析を実施し、解析手法の妥当性について検証した。

本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 自由面近傍における破壊挙動については、一爆破進行長の範囲で2次元的な議論が可能である。
- 2) 振動伝搬傾向については、孔奥方向への振動が小さくなるという指向性の存在が推測された。
- 3) 発破挙動は厳密には3次元挙動であるが、1)および2)の結果をふまえ、3次元挙動との差異を念頭におけば、自由面発破の数値解析的検討に2次元解析を適用することは可能である。
- 4) 第4章で構築した解析手法を用いた再現解析では、ガス圧や解析パラメータを適切に設定することにより、発破実験により得られた破壊や振動の挙動をおおむね再現することができた。

以上の結果より、個別要素解析による検討手法を検証できたと考える。また、岩盤地山に対しても、解析パラメータを適切に設定することで当該解析手法の適用が可能と判断できる。

第6章「遠方場における放射波動の伝搬特性」では、第5章の発破孔近傍における議論に対して、遠方での振動の影響を議論するため、遠方場近似を適用することで、放射された波動エネルギーが地山内でどのような伝搬特性を示すかを調べた。ここでは、個別要素解析で得られた発破孔近傍の波動場に対して遠方場近似を適用し、発破振動が問題となる低周波域として200Hz帯の波動場について考察した。また、得られた波動場について動弾性時間域境界要素法および理論解を用いて検証した。

本章で得られた成果を以下に示す。

- 1) 発破孔から放射され遠方場に伝搬する波動は、P波およびS波の成分を有しており、

それぞれ指向性が異なる伝搬特性を示す。

- 2) P 波は、自由面と平行方向に卓越した波動場が形成され、鉛直方向に対する放射波動は小さい。
- 3) S 波は、発破孔から放射された P 波が自由面で反射する際に発生するものであり、自由面と鉛直方向および平行方向にはほとんど発生しないが、自由面に対して約 35° 方向に卓越した波動場が形成される。
- 4) 上記の S 波は、自由面長を長くすることによってさらにエネルギーが強くなり、遠方場において卓越する。

以上の結果より、P 波と S 波とでは伝搬特性が異なるものの、自由面発破における自由面パターンは、制約物件に対して自由面が鉛直となるように設計することが合理的であることを示した。

第7章「自由面発破の振動低減効果の解明」では、今後、自由面発破の合理化や最適化を図っていくためには、自由面による振動低減効果を明らかにする必要があると考える。そのため本章では、第4章および第6章の解析手法を適用し、心抜き発破を対象として、自由面の無い通常の発破と自由面発破とを比較したケーススタディを実施することで、自由面による振動低減効果の解明を試みた。なお、通常の心抜き発破については、最小抵抗線長を大きくすることでこれと近似し、自由面発破と定性的な比較を行なった。

本章で得られた成果を以下に示す。

- 1) 最小抵抗線長が大きくなるに伴い破壊面積は増加するが、ある一定値より大きくなると破壊面積の増加傾向が緩くなる。
- 2) 放射波動および破壊エネルギーは、最小抵抗線長が大きくなるに伴って増加するが、一定以上大きくなると増加傾向が止まる。運動エネルギーは最小抵抗線長と反比例の関係を示す。
- 3) 最小抵抗線長を小さくすることで放射波動エネルギーを低減できるが、発破掘削の効率が損なわれる。自由面発破では、掘削効率と振動低減との間にはトレードオフの関係が存在する。
- 4) 自由面の存在によって波動の放射に指向性が現れる。とくに遠方場においては、P 波は自由面に沿う方向で放射波動が大きく、S 波は自由面に対して約 35° 方向に放射波動が大きくなる。ただし、この指向性は最小抵抗線長の大きさに影響を受けない。

- 5) 自由面の形成によって効果的に振動を低減できるのは、最小抵抗線長がおおむね 0～40cm の範囲であり、掘削効率も考慮すれば、現実的な最小抵抗線長の範囲は 20～40cm と判断される。

また、自由面発破における振動低減のメカニズムは次のように整理することができる。

- 1) 自由面を形成することで最小抵抗線長を大幅に小さくでき、自由面側の岩盤を最小限の爆薬量で効率的に破壊できる。
- 2) 発破によって発生したエネルギーは、破壊エネルギーと運動エネルギーとに費やされることで、外周に放射される波動エネルギーの比率が相対的に低減される。
- 3) 自由面側の岩盤が破壊されることで反力体が無くなり、外周に放射される波動が低減される。
- 4) 放射される波動は、P 波および S 波ともに指向性があり、自由面と鉛直方向で波動の放射が小さくなる。

第8章「合理的な自由面形成パターンの検討」では、自由面発破の合理的な設計手法の確立を目的として、自由面長さと最小抵抗線長に着目したケーススタディを実施した。

本章で得られた成果を以下に示す。

- 1) 掘削効率の観点からは、最小抵抗線長を大きくし、自由面長を長くするほどその効果が高いが、最小抵抗線長 $d=20\text{cm}$ では自由面長 $L=2.0\text{m}$ 程度、 $d=30\text{cm}$ では $L=2.5\text{m}$ 程度が上限である。
- 2) 放射波動エネルギーに対する自由面長の影響は非常に小さいため、振動低減の目的のみであれば自由面長はあまり長くする必要はない。最小抵抗線長に応じて $L=1.0\sim 2.0\text{m}$ 程度で十分である。1)に示した掘削の効率性も考慮し、 $L=2.0\sim 3.0\text{m}$ 程度を上限として自由面長を設定する。
- 3) 自由面を形成することにより、放射波動エネルギーには指向性が生まれるが、発破孔近傍ではこの指向性は自由面の長さあまり影響を受けない。
- 4) 自由面を長くすることで、距離減衰の小さな S 波が指向性を持って発生するため、遠方場では、自由面長を長くすることで S 波が卓越する。

以上の結果より、最小抵抗線長に応じた自由面長 L の目安を表 8.7 として提案した。

9.2 今後の課題と展望

従来，自由面発破パターンの設計には確立された考え方が存在せず，その設定過程には明確な根拠が見受けられず，既往の施工事例を踏襲したものがほとんどであった．これに対して本研究では，合理的な自由面発破パターンの設計に向けて，自由面発破の動的破壊と振動とを適切に評価できる数値解析手法を構築し，自由面による振動低減効果を明らかにするとともに，自由面パターン設計のための基礎的な知見を得ることができたと考えている．

今後さらに，自由面発破の適用性を向上するため，残された課題と展望を示す．

(1) 解析モデル

1) 3次元解析

第5章の発破実験では奥行き方向の振動が小さくなるという指向性の存在が推測されたことから，本研究では2次元の個別要素解析を適用した．ただし，発破に伴う現象は厳密には3次元挙動である．本研究では，自由面と発破孔との平面的な位置関係での検討を行ったが，とくに，自由面の深さについての検討や自由面を回折する振動については，2次元での検討が不可能である．今後，より詳細な検討を行うため3次元解析を適用することが期待される．

たとえば，自由面の深さと発破孔の位置や長さの関係などは，3次元解析を適用することでより詳細な検討が可能となり，適切な自由面の深さを検討できるなど，より効率的かつ効果的な自由面パターンの設定が可能になると期待できる．

ただし3次元解析では，解析領域を拡大したり要素サイズを小さくしたり，解析精度の向上を図ると解析時間が急激に長くなる．このため，解析コストを考慮すると，現状での3次元解析は，マクロなオーダーでの破壊挙動やエネルギー伝搬について理解することが現実的な用途と考えられる．コンピュータの能力向上など解析技術の飛躍的な進展を期待したい．

2) 地質情報

また，本研究では，波動が伝搬する周辺地山を等方均質と仮定したが，実際の地山が等方均質であることはない．地質境界や破碎帯等の不連続面が存在することによって，波動は反射，屈折および透過減衰するが，一般に，

- ・トンネル外周の地質構造を明らかにすることは、現在の地質調査技術ではきわめて困難である。
- ・仮に地質構造が明らかになったとしても、それぞれの地質について解析パラメータを適切に設定することは困難である。

このため、発破振動を定量的に評価することは現状では困難である。ただし、これは自由面発破に限定した問題ではなく、発破問題の数値解析において共通の課題と言える。

3) ガス圧の設定

本研究では、発破孔の内壁に作用させるガス圧は、第5章で示したとおり、発破実験の結果より同定したガス圧を確からしいものとして使用した。ただし、含水爆薬は非理想爆薬であることから、発破条件（爆薬の種類、装填方法等）が異なる場合、今回の同定結果から類推することが適切とは言えない。また、潜在的に亀裂の多い地質と少ない地質とでは破壊挙動が異なると想定され、式(7.2)で示した状態方程式にもとづけば、ガス圧は地質ごと（破壊の仕方ごと）に異なると考えられる。したがって、実施工に適用する場合、ガス圧の設定には留意する必要がある。

しかしながら、ガス圧を直接計測することは現状ではきわめて困難である。ガス圧の適切な設定はこれからも課題として残る。今後の可能性として、技術的難易度は高いと考えるが、第5章のように切羽近傍で時刻歴応答加速度を計測し、逆解析によりガス圧を同定することも有効な手法と考える。

(2) 解析結果の評価

本研究では、発破に伴う振動の影響を放射波動エネルギーにより評価している。一方、実務において発破振動の影響は、一般に振動速度（kine）あるいは振動レベル（dB）で評価するため、定量的な検討を行なうためには振動速度あるいは加速度（振動レベルは加速度にもとづいて算定される）を算出する必要がある。このための手段としては、個別要素解析の解析領域を拡大して、検討位置における振動速度あるいは加速度を直接算出することが最も容易である。しかしながら、この場合、3次元解析と同様に解析コストの問題が発生する。また、前述のとおり、周辺地山の地質構造を完全に明らかにすることはできないため、地質構造のモデル化およびパラメータ設定になんらかの仮定を行なわざるを得ない。

このため、発破振動の定量的評価を行なうためには、本研究で得た自由面発破に関する

知見と式(1.1)のような経験式とを結びつける方法が当面の現実的な対処と考えられる。例えば、自由面発破パターンに応じた発破係数 K 値の目安を、今後の解析および実施工の結果をふまえて設定する方法が考えられる。

(3) 自由面の形成パターン

本研究では、議論を容易とするため、発破振動がもっとも問題となりやすい心抜き部に着目し、単発発破を対象とした検討を行なった。この結果、自由面発破における振動低減効果の解明や、合理的な自由面発破パターン設計のために一定の成果をあげることができたと考える。しかしながら、第2章で示したとおり自由面発破には、心抜き部に自由面を設けるパターンだけでなく、掘削断面の外周部に自由面を設ける場合や、心抜き部と外周部の自由面を併用する場合がある。

外周部に自由面を設けるパターンについては、発破孔奥行き方向の振動が小さくなると推測されるとはいえ、これをゼロと見なすと危険側で評価する可能性があるため、自由面先端部からの振動の回折も考慮する必要がある。しかしながら、2次元解析ではこのような回折の影響を検討することができない。また、自由面を組み合わせる場合には、複数の発破孔を考慮した段発発破の検討も必要になると考える。3次元解析の適用と同様に、今後の解析技術の向上に期待したい。

謝 辞

本論文の取りまとめにあたって、新潟大学工学部 阿部和久教授には、新潟大学大学院自然科学研究科への入学を快く受け入れて頂くとともに、終始変わらないご指導とご鞭撻を賜り、紙面に書きつくせないほどお世話になりました。ここに、甚大なる感謝を申し上げます。

また、本論文の審査にあたって多くの貴重なご指導およびご助言を賜りました新潟大学工学部 泉宮尊司教授、同 佐伯竜彦教授、同大学院自然科学研究科 紅露一寛準教授に深く感謝申し上げます。

本研究を取りまとめることができましたのは、私が勤務する株式会社福田組のご理解とご支援があつてのことと存じます。株式会社福田組代表取締役 太田豊彦社長、同取締役 八鍬耕一土木部長、同技術部 長野正部長、同技術企画部 桜澤雅志部長には、博士後期課程進学へのご助力にとどまらず、研究の遂行に多大なるご理解とご支援を賜りました。厚く感謝申し上げます。

本研究は、2010～2011 年にかけて施工された尾道松江自動車道 横畠トンネル工事において実施した、切羽に自由面を設けた低振動発破の施工実績に端を発しています。近接施工における自由面発破の施工機会を与えていただくとともに、データ収集等でご理解およびご協力いただいた株式会社福田組横畠トンネル作業所(当時) 木村能隆氏、多田芳葉氏はじめ関係各位に心から厚くお礼申し上げます。また、横畠トンネルの施工時においては、NPO 法人臨床トンネル工学研究所 中川浩二理事長（山口大学名誉教授）に、自由面発破に関してさまざまなご助言を頂きました。厚く感謝申し上げます。思い起こせば 2010 年 11 月 27 日(土)、横畠トンネルで取りまとめた計測結果を中川理事長にお見せした際、「これは論文のテーマになるのではないかと仰っていただきました。この一言が、学位論文とは縁のない私が本研究をスタートさせる第一歩につながったと存じます。重ねて感謝申し上げます。

本研究で行なった発破実験におきましては、株式会社福田組東北支店 若生成弘氏、佐藤和広氏に多方面から支援をいただきました。株式会社ジャペックス 早川部長には、JWL パラメータの算出だけでなく、発破の実務において貴重なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。また、数値解析業務およびデータ取りまとめにおいては、新潟大学大

学院自然科学研究科博士前期課程の石沢浩太氏（現 秋田県）および齋藤優氏，ならびに関係諸氏に多大なる協力をいただきました．心より感謝いたします．

その他，本論文の完成に至るまで，上記以外にも多くの皆様からも有形無形のご支援とご協力を賜りました．この場をお借りして感謝を申し上げます．

最後に，これまでの私に関わっていただいた全ての方々に感謝いたします．

2016 年 3 月

若月 和人