

### 博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 若月 和人  
学位 博士 ( 工学 )  
学位記番号 新大院博 (工) 第 451 号  
学位授与の日付 平成 28 年 3 月 23 日  
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当  
博士論文名 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

論文審査委員 主査 教授・阿部 和久  
副査 教授・泉宮 尊司  
副査 教授・佐伯 竜彦  
副査 准教授・紅露 一寛

### 博士論文の要旨

本論文では、トンネルの発破掘削を対象に、切羽に自由面を設けることによる地盤振動低減効果について、数値解析と実験とに基づき検討を行っている。

第 1 章では、研究の背景と目的とが述べられており、現在採用されている振動低減工法と既往の研究について、その概要がレビューされている。特に、自由面形成の有効性が経験的に立証されているものの、その効果に関する理論的議論がほとんどなされていないことが指摘され、メカニズム解明の意義が述べられている。

第 2 章では、振動低減方法の対象を自由面発破工法に限定し、その現状と課題とについて、さらに詳細に整理している。また、過去に報告がなされた施工事例をデータとしてまとめ、それらの特徴について事例毎に解説している。

第 3 章では、研究手法として数値解析を中心に用いることを前提として、発破に関する数値解析手法の現状について述べている。ここでは主要な解法として、有限要素法の他に、差分法、個別要素法、不連続変形法などが用いられていること、それらによる解析においては主に発破孔近傍の応力状態や、破壊性状などが議論されていることなどが述べられている。一方、発破により周辺に放射される波動の伝播特性など、遠方場への影響については全く検討がなされておらず、地盤振動低減の観点からは、その評価が課題となる旨が述べられている。また、発破孔に作用するガス圧の時刻歴についても、明確な根拠が無いまま、幾つかの関数形状のものが採用されており、発破過程の適切な評価には、ガス圧の再現が重要であることを指摘している。

第 4 章では、発破による地山の破壊・飛散から波動の放射までの一連の動的挙動の再現解析に個別要素法を用いる場合を念頭に、各種力学モデルの設定方法について論じている。特に発破効率を定量的に議論するための指標として、飛散する岩塊の運動エネルギー、亀裂進展時に費やされる破壊エネルギー、外部に放射される波動エネルギーなどの物理量の具体的評価方法が示されている。また、発破の際に破砕される地山の岩塊サイズについて既往の研究結果に基づき整理し、発破孔近傍における個別要素サイズを検討している。

第5章では、コンクリート供試体を対象とした発破実験について述べている。前述のとおり、発破孔内に作用するガス圧の時刻歴は、その測定が困難であるため、これまで把握されていなかった。また、本研究では二次元個別要素モデルによる解析を前提としているが、二次元モデルによる評価の妥当性が必ずしも明らかでない。そのため、当該の実験を通して、これらの事項について検討している。ガス圧については、供試体表面で計測した加速度データから、それを再現し得るように逆推定して求めている。また、供試体の破壊性状が発破孔長手方向にほぼ二次元的であることから、発破孔近傍の破壊解析に限定すれば、二次元モデルで十分であることを見出している。続いて、推定したガス圧設定の下、個別要素による破壊解析を試みている。その結果得られた発破孔周辺の亀裂の進展挙動が、実験における亀裂パターンと概ね一致していることから、当該解析モデルの妥当性を検証している。

第6章では、遠方場における波動の放射特性について検討している。上述のとおり、発破孔近傍では二次元解析が適用可能であるものの、そこから放射される波動の遠方における伝播特性は三次元的なものとなるものと考えられる。そのため本論文では、筒状の発破孔から波動が円筒状に放射されるものと仮定し、発破孔近傍の円筒境界で評価した力学量より、遠方の三次元波動場を積分表現式により記述する方法を採っている。さらに、無限遠方での波動特性を抽出するために、基本解に遠方場近似を適用し、縦波と横波成分とを分離して評価している。その結果、縦波成分の伝播は自由面方向に卓越し、横波成分はそこから斜め方向に卓越することを見出している。また、発破孔からは縦波のみが放射されるにも関わらず、遠方場ではむしろ横波成分が支配的となることを明らかにしている。さらに、この原因を調べるために、発破孔から放射された縦波のスリット周辺での伝播の様子を時間域境界要素法により解析している。その結果より、縦波が自由面から反射する際に発生する横波成分の距離減衰性が縦波に比べ低いことを理論的に突き止め、それが遠方場の主要成分を構成する機構を明らかにしている。

第7章では、発破孔から自由面までの距離(最小抵抗線長)が、破壊領域面積や放射波動エネルギーなどに及ぼす影響について調べている。その結果、40cm以下の最小抵抗線長で振動低減効果が認められることや、40cm以降では破壊面積の増加率が減少することなどを見出している。

第8章では、7章の結果に基づき、適切な最小抵抗線長と自由面長の設定について検討している。その結果、破壊面積をある程度確保しつつ振動を抑制するためには、20~40cmの最小抵抗線長に対応して、自由面長を1~3mの範囲で設定するのが適切であると結論付けている。また、横波と縦波の指向性を考慮して自由面の向きを設定することを提案している。

#### 審査結果の要旨

トンネルの発破掘削の際の振動低減は、民家等が近接する場合に必要となる。低減策の一つとしてトンネル切羽に自由面を形成する方法が検討され、一定の効果が得られてはいたものの、その理論的根拠は明確にされて来なかった。本論文はこの問題に取り組んだものである。そのために、従来全く議論のなされていなかった、遠方場における波動の放射特性の評価を試み、個別要素解析と積分表現式との併用によりそれを可能としている。本論文で得られた縦波と横波成分の伝播特性は始めて明らかとなったものである。また、最小抵抗線長や自由面長が、破壊エネルギーや放射波動エネルギーなどに及ぼす影響も、本論文で始めて明らかとなった事項であり、本論文で示されている成果は振動低減策を講ずる上で非常に有用な知見を与えている。さらに、コンクリート供試体による発破実験は初めての試みであり、これに基づく発破孔内部のガス圧推定や個別要素解析の妥当性の検証などは、今後当該分野で数値解析を実施する上で貴重な情報を提供している。以上より、本論文は、その先駆性、有用性においてトンネル工学の発展に寄与するところ大である。

よって、本論文は博士(工学)の博士論文として十分であると認定した。