

	きよの ふみお
氏 名	清野 文雄
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成9年9月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和59年3月 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻前期課程 修了
学位論文題目	加振機構による高速水噴流の切削性能改善法に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 松木 浩二 東北大学教授 井小萩利明 東北大学教授 小濱 泰昭 東北大学助教授 幾世橋 廣

論文内容要旨

水噴流技術は、(1)自動化、ロボット化が容易であること、(2)狭い空間での作業性に富み、かつ遠隔操作が容易であること、(3)熱、粉塵の発生がないこと等、従来の掘削技術に比較して多くの利点を有する。今後、高レベル核廃棄物の地層処分、CO₂の地層処分またはLNG地下貯蔵等、地殻工学の応用範囲が広がるにしたがい水噴流技術の必要性はますます増加するものと考えられる。しかしながら、その切削性能はビット、バイト等の工具による機械的掘削法に比較して必ずしも高くなく、その改善が望まれてきた。

通常水噴流に時間的な変動を加えるとスラグ水噴流、脈動水噴流等の非定常水噴流が形成され、水噴流による物体の壊食に非定常作用が関与するようになる。非定常水噴流のせき止め圧力は通常水噴流のせき止め圧力と比較して大きく水噴流の破壊力が高まることが期待できる。

このような非定常水噴流を地殻工学分野で用いるためには、まず、小型かつ簡単な加振機構を有するノズルを考案する必要がある。また、ノズルの噴射室の形状、ノズル口径、流速等の各種のパラメータに対し最適な周波数を設定する設計手法を確立しなければならない。このためには、加振によるせき止め圧力の振動発生機構および水噴流中におけるその伝播特性を明らかにする必要がある。さらに、切削実験により切削性能向上の効果を実証しなければならない。

本研究は、このような観点から、振動を加えることにより水噴流の切削性能の向上を図る技術の一連の基礎を確立することを目的として、まず、水噴流のせき止め圧力の測定方法を提案した。切

削機構を解明し、またノズルの性能評価を行うためには、水噴流の圧力変動特性を正確に測定することが重要だからである。次に、通常水噴流を用いて壊食実験ならびにせき止め圧力の測定実験を行い、せき止め圧力の振動と壊食量との関係について詳細に検討し、強制的に振動を加えることによる水噴流の切削性能向上の可能性を示した。次に、電歪型加振機構を用いたノズル、すなわち電歪型加振ノズルを開発し、そのせき止め圧力の振動発生機構を解析するとともに、加振ノズルから噴射された水噴流のせき止め圧力の測定を行った。さらに、このせき止め圧力の振動の水噴流中における軸方向の伝播特性について検討した。加えて、電歪型加振ノズルを用いて壊食実験を行い、切削性能の改善効果を実証するとともに加振した場合の切削性能改善のメカニズムについて考察した。

本論文は7章より成る。

第1章は、緒論であり、本研究の意義と目的、また関連する従来の研究および本研究の概要を述べた。

第2章では、せき止め圧力のデータ処理方法として、デジタルフィルタを利用したデコンボリューション法を提案するとともに、通常水噴流のせき止め圧力の測定実験を行い、以下の結論を得た。(2-1)提案したデコンボリューション法は、ガラス管の圧壊に対する応答から圧力計測システムの周波数特性を求め、周波数領域でその逆特性フィルタを設計し、時間領域でデータ処理を行うものである。

(2-2)上記デコンボリューション法をせき止め圧力のデータ処理に適用し、圧力計測システムの特性に依存しないせき止め圧力の原波形の特性が得られること、従来の周波数領域デコンボリューション法による結果とほぼ等価な性能を有することを明らかにした。

第3章では、通常水噴流を用いたアルミニウム試料の壊食実験、せき止め圧力の測定実験ならびに銅蒸気レーザのパルス光を用いた流れの可視化実験を行い、以下を得た。

(3-1)アルミニウム試料の壊食実験の結果、壊食量はノズルからある程度はなれた位置でピークを示すこと、ノズルからの距離が離れるにしたがい壊食孔の形状はリング型から井戸型、すり鉢型へと変化することを明らかにした。

(3-2)通常水噴流のせき止め圧力の測定実験ならびに流れの可視化実験の結果、これまで報告されてきた圧力振動のピークが水噴流の界面の脈動、または流れ全体の脈動に基づいていることを実証した。

(3-3)せき止め圧力の振動と壊食量との関係について詳細に検討し、圧力振動の振幅スペクトルのピーク高さはスタンドオフ距離が大きくなるにしたがって増加しており、 L/d - M 曲線と強い相関性を有していること、壊食面の電子顕微鏡観察結果によれば、スタンドオフ距離が小さい領域での壊食は圧力振動に関連したキャビテーション、または圧力の振動による疲労破壊に起因している可能性が存在することを明らかにし、水噴流に振動を与えることによる切削性能向上の可能性を示した。

第4章では、まず、圧電素子を利用して水噴流に振動を加える電歪型加振ノズルを設計・製作した。次に、試作した電歪型加振ノズルによるせき止め圧力の振動発生機構を解析した。さらに、電歪型加振ノズルから噴射された水噴流のせき止め圧力を測定するとともに瞬間写真観察を行い、以下を得ることができた。

(4-1)せき止め圧力の振動発生機構を解析し、振動放射面の振動速度振幅の評価式、噴射口における音圧振幅の評価式ならびにせき止め圧力の振動振幅の評価式を得た。

(4-2)電歪型加振ノズルから噴射された水噴流のせき止め圧力を測定し、発振器の発振周波数に同期してせき止め圧力の振動が生じること、加振ノズルへの供給電力を増加するにしたがいせき止め圧力の振動振幅が大きくなること、供給電力が同一の場合には振動周波数が小さい方がせき止め圧力の振動の振幅は大きくなることを明らかにするとともに、上記評価式の妥当性を検証した。

(4-3)レーザシート法を用いて電歪型加振ノズルから噴射された水噴流の瞬間写真観察を行い、水噴流の流速が低い場合には電歪型加振ノズルから噴射された水噴流の気液界面は脈動し、脈動水噴流が形成されることを明らかにした。

第5章では、電歪型加振ノズルにより水噴流に加えた圧力振動の流れの軸方向に対する伝播特性を解析するとともに、圧力振動の軸方向伝播特性を測定し、以下を得た。

(5-1)圧力振動の流れの軸方向に対する伝播特性を流れの安定性理論を用いて解析し、ノズル径、流速等の各種の条件下において最適の振動周波数を与える線図を導いた。

(5-2)水噴流に加えた圧力振動の軸方向伝播特性を測定し、振動周波数38kHzの場合と27kHzの場合とで圧力振動の伝播特性を比較すると38kHzの方が圧力振動の減衰は大きくなること、噴流径1.0mmならびに1.6mmの場合において圧力振動の伝播特性を比較すると1.6mmの方が圧力振動の減衰が大きいことを明らかにするとともに、上記線図からの予測と一致することを示した。

第6章では、加振された水噴流によるアルミニウム試料ならびに赤レンガ試料の壊食実験を行い、壊食量増加のメカニズムについて考察した。その結果、以下を得ることができた。

(6-1)壊食実験の結果、供給電力を増しせき止め圧力の振動振幅を増加するにしたがって壊食量は増加すること、供給電力一定の条件下では、振動周波数が低いほど壊食量増加の効果が大きいこと、圧電素子への供給電力を増加し振幅を増大するにしたがって壊食速度が速くなること、壊食量の増加量はスタンドオフ距離 $L/d=55$ の位置で1つのピークを示し、さらにスタンドオフ距離が離れると加振による壊食量の増加量は次第に減少し、ついにはその効果が見られなくなることを明らかにするとともに、加振による水噴流の切削性能の改善効果を実証した。

(6-2)走査型電子顕微鏡を用いたフラクトグラフィによりアルミニウム試料の壊食量増加のメカニズムについて考察し、その結果、 $L/d < 68$ の領域における振動の付与による壊食量増加効果が水噴流の気液界面における現象に密接に関連しており、液滴の衝突により生成したと考えられる非常に多数のクレータが存在すること、 $L/d > 68$ の領域では、加振された水噴流を用いた場合には、通常水噴流の場合と比較してクレータ径が増大していることを明らかにした。

(6-3)加振された水噴流による赤レンガ試料の穿孔実験を行い切削性能改善の効果が延性材料および脆性材料に対し有効であることを実証した。

第7章は結論であり、本論文を総括し、地殻工学における技術的問題解決策としての加振機構による高速水噴流の切削性能改善法の可能性を示した。

各章で得られた成果を体系化しFig.1に示す。

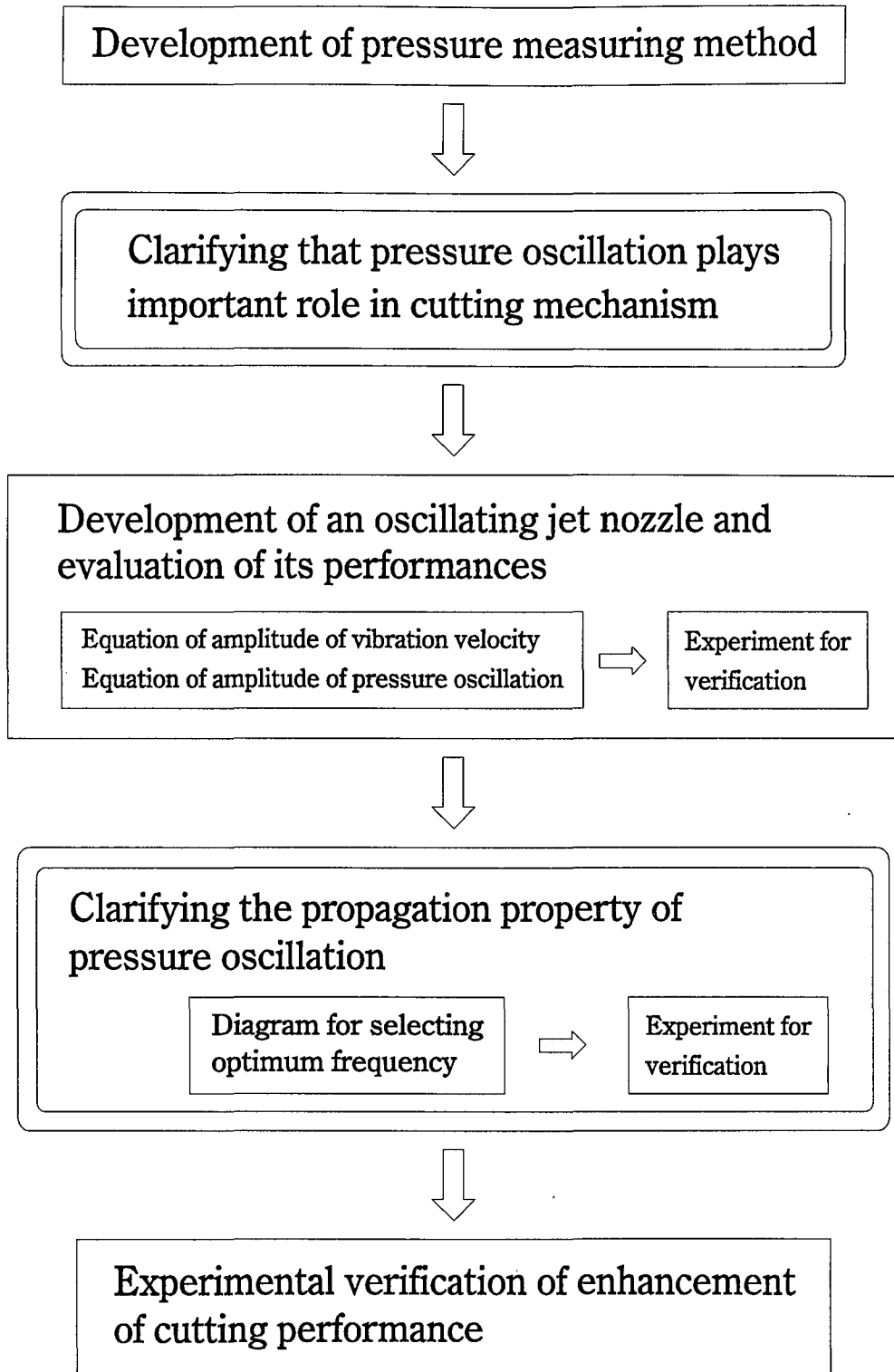


Fig.1 Body of results of this study.

審査結果の要旨

高速水噴流技術は、自動化が容易であることなど従来の掘削技術に比較して多くの利点を有する反面、その切削性能は必ずしも十分ではなく、改善が望まれてきた。本論文は、高速水噴流に振動を加えることにより切削性能の向上を実現した電歪型加振ノズルの開発経過をまとめたものである。

第1章は、緒論である。第2章では、圧力測定系の周波数特性の影響を除いた正確なせき止め圧力の測定方法としてデジタルフィルタを利用したデコンボリューション法を提案し、本方法によりせき止め圧力原波形の周波数特性が得られることを実証している。これは有用な知見である。

第3章では、通常水噴流を用いたアルミニウム試料の壊食実験、せき止め圧力の測定実験ならびに銅蒸気レーザパルス光を用いた流れの可視化実験を行い、圧力振動が水噴流の脈動に起因していることを示すとともに壊食量がせき止め圧力の振動成分と強い相関性を有していることを明らかにし、水噴流に振動を加えることにより切削性能が向上する可能性を見出している。

第4章では、前章で得られた知見に基づいて圧電素子を用いた電歪型加振ノズルを設計・製作し、振動放射面の振動速度振幅の評価式ならびに噴射口におけるせき止め圧力の振動振幅の評価式を導くとともにその妥当性を実証している。

第5章では、流れの安定性理論を用いて圧力振動の軸方向伝播特性の解析を行い、ノズル径、流速等の各種条件において最適の振動周波数を与える条件を導き、加振周波数が低くまた噴流径が小さい方が圧力振動の減衰が小さいことなどの予測が実際の測定結果と一致することを示している。これは重要な知見である。

第6章では、電歪型加振ノズルを用いて延性材料と脆性材料の壊食実験を行い、供給電力の増加によるせき止め圧力振動振幅の増加に伴って壊食量が増加すること、振動周波数が低いほど壊食量の増加が大きいこと、壊食量の増加は比較的小さいスタンドオフ距離で最大になることなどを明らかにし、高速水噴流の切削性能が加振により格段に改善することを実証している。

以上要するに、本論文は、高速水噴流の電歪型加振ノズルを考案してその切削性能向上を実証するとともにせき止め圧力の振動発生機構および水噴流中の振動伝播特性を明らかにすることにより最適な加振周波数の設計手法を示したものであり、地殻工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。