

氏 名	奥 村 清 彦
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 15 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 31 年 3 月 宮 城 県 工 業 高 等 学 校 電 気 科 卒 業
学 位 論 文 題 目	水 中 に お け る ウ ォ ー タ ー ジ ェ ッ ト の 切 削 性 能 に 関 す る 研 究
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 松 木 浩 二 東 北 大 学 教 授 小 林 陵 二 東 北 大 学 教 授 橋 本 弘 之 東 北 大 学 助 教 授 幾 世 橋 広

論 文 内 容 要 旨

現在、地設工学および資源工学の分野においては、鉱物資源の開発、高レベル核廃棄物の地層処分あるいはエネルギー貯蔵のための地下構造物の設計や建設に関わる技術向上の必要性が増大している。このような地下においては、高圧あるいは水環境、さらには大きな設備や装置が入り込めない狭い空間等極めて厳しい状態が考えられ、無人化や自動化が必須条件となるが、これに対応できる新しい技術としてウォータージェット技術が注目されている。現在考えられる具体的応用技術例を挙げれば、岩盤、コンクリート構造物の切削や掘削の他、地熱・石油・ガス開発の際に発生するスケールのクリーニング、天然ガス井ケーシングパイプのパフォーマンス等があり、その具体化のためには気中に加えて高圧下を含む水中でのウォータージェットの性能評価や各種材料のウォータージェットによる破壊機構を知ることが重要である。また、多くの場合、対象物に対してノズルを移動しながら作業する必要から送り切削による性能を把握する必要がある。

本研究では、最大吐出圧力 98.1MPa、最大流量 80 l/min のウォータージェットを用い、まず第一に、地下岩盤に対するウォータージェット技術の実用化のための基礎的知見を得ることを目的とした研究を行った。即ち、岩石類に対し、気中から 20MPa の高圧水中までの各種環境において、単一ノズルによる送り切削試験を行い、ノズル形状、吐出圧力、ノズル径、ノズル送り速度、スタンドオフ距離等の各種パラメータの切削性能に及ぼす影響ならびに切削性能と切削対象試料の物性値との関係を明らかにし、さらに、試験後の切削面の観察やウォータージェットの衝突力の分析を通じてウォータージェットの切削機構について考察を行い、岩石等に対するウォータージェットの切削性能を評価した。次に、現場に対応した応用研究として、複数ノズルを有する回転型ノズル装置を用いた地熱発電所のパイプに付着したスケールの浅い水中における除去試験ならびに地下 1,000m を模擬した高圧水中における水溶性天然ガス井用塩化ビニルケーシングパイプの固定ノズルを用いたパフォーマンス試験を行い、ウォータージェットの具体例における実用性を評価した。

本論文は 8 章より成る。

第 1 章は緒論で本研究の目的、概要ならびに従来の研究例について述べている。

第 2 章と第 3 章では、それぞれ、気中および浅い水中において、5 種類の岩石等に対し各種パラメータを変化させてウォータージェットによる送り切削試験を行い、各切削条件と切削深さの関係、試料の力学的性質ならびにウォータージェットの衝突力等と切削性能の関係について気中と浅い水中の場合を比較して検討した。特に本研究では、従来の研究に見られない、実用的な切削深さが得られる送り速度条件で、切削できなくなるまでの広範囲のスタンドオフ距離について検討を行った。第 2 章ならびに第 3 章で得られた主な知見は次の通りである。

- (1) 気中、浅い水中とも各試料ごとに切削不能となる下限の吐出圧力（限界吐出圧力 (p_c) と呼ぶ）がある。切削深さ (h) は、吐出圧力 (p) と限界吐出圧力の差に比例し、送り速度 (v) のべき乗に反比例する。
- (2) 吐出圧力が大きく送り速度が小さい場合、浅い水中の方が大きな切削深さが得られる場合が多く、これは、主として水中におけるキャビテーション壊食の効果による。
- (3) 限界吐出圧力は、気中より浅い水中の方が大きく、スタンドオフ距離 (L) およびノズル径 (d) には大きな影響を受けない。
- (4) 切削できなくなる限界スタンドオフ距離 (L_0) が存在し、これは、吐出圧力、ノズル径とともに大きくなるが、浅い水中では気中に比べ著しく小さい。スタンドオフ距離が大きい場合の切削深さは限界スタンドオフ距離からの距離に依存する。
- (5) 切削深さはノズル径のべき乗に比例する。
- (6) 切削深さに及ぼす各種パラメータの影響は基本的には気中、浅い水中とも同じであり、任意のスタンドオフ距離に適用可能な気中と水中に共通の実験式として次式を提案した。

$$h = k(1 - L/L_0)^\gamma d^\beta \cdot v^{-n} \cdot (p - p_c)$$

ただし、 γ 、 β は環境に依存しない定数である。

- (7) 限界吐出圧力は気中、浅い水中とも試料岩石の引張強度とほぼ直線関係にあり、また、係数 n は試料強度にはあまり依存せず、主として噴流環境によって決まる。
- (8) 気中での切削面は筋模様を呈し、浅い水中ではキャビテーション特有の壊食痕が特徴的である。
- (9) 気中、水中とも、衝突力の平均値よりもその振幅成分が切削深さとよく対応する。このことから、岩石等に対する切削にはキャビテーションが重要な役割を果たしていると考えられた。

第4章では、高水圧環境下におけるウォータージェットの切削性能を明らかにする目的で、環境水圧を約20MPaまで模擬できる試験装置を試作し、白河溶結凝灰岩試料に対して送り切削試験を行い、切削深さに及ぼす各種パラメータの影響を明らかにするとともに、高圧水中における切削機構について考察し、特にキャビテーションとの関係について検討を行って以下の主な知見を得た。

- (1) 切削深さと環境水圧 (p_a) との関係は、環境水圧の増加とともに切削深さが急激に減少する低い環境水圧領域と、切削深さが環境水圧に依存せずほぼ一定となる高い環境水圧の領域に分かれる。また、高い環境水圧である水中深部でもウォータージェットによる切削が可能である。
- (2) 高圧水中での切削深さを表す次の実験式を初めて提案した。

$$h \propto v^{-n} \cdot p_a^{-\alpha} \cdot \{1 - (L - L_0)\}^\gamma \cdot d^\beta \cdot (p - p_c)$$

ただし、定数 α は環境水圧0.588MPaで変化し、 β は浅い水中よりやや大きく、 γ 、 n は環境水圧に依存しない。また L_0 は限界スタンドオフ距離、 p_c は限界吐出圧力である。

- (3) ノズル出口でのキャビテーション係数による考察を行った結果、切削深さが環境水圧に依存する環境水圧領域では、切削深さがキャビテーション係数に依存し、この領域ではキャビテーション壊食が重要な役割を果たしていると考えられた。このことはキャビテーション壊食痕の観察結果や切削溝幅に及ぼすノズル送り速度の影響に関する結果ともよく一致した。環境水圧に依存しない高い環境水圧領域との境界のキャビテーション係数は、白河溶結凝灰岩の場合0.05であった。

第5章では、水中における切削性能向上を目的として、4種類の開き角度のホーン型ノズルを作製し、水深300mmの水中で白河溶結凝灰岩に対して送り切削試験を行い、ホーン型キャビジェットノズルの切削性能について検討を行った。その結果、ストレートノズルと対比した場合のホーン型ノズルの切削性能に関する以下の知見を得た。

- (1) ホーン型キャビジェットノズルを用いることによりストレートノズルに比べて大きな切削深さを得ることができる。また、ホーン型キャビジェットノズルは特に切削体積において大きな切削性能を有する。
- (2) 切削体積が最大となる最適のスタンドオフ距離がある。
- (3) 岩石切削に効果的なホーン角度は中心軸からの角度が45°付近である。
- (4) ホーン型ノズルの衝突力の振幅成分はストレートノズルのそれよりも大きく、ホーン型ノズルにおいてはストレートノズルより激しいキャビテーションが発生している。

第6章では、ウォータージェットによる地熱スケール除去性能を明らかにする目的で、地熱発電所現場から採取した鋼製パイプ内壁に付着した3種類のスケールに対し、独自に製作した回転型ノズルを用いて水中での除去試験を行った。その結果得られた主な知見は以下の通りである。

- (1)十分な大きさの吐出圧力を用いれば、ウォータージェットによってパイプ内壁を損傷することなく地熱スケールをほぼ完全に除去することができる。
- (2)除去を行うのに必要な吐出圧力は、スケールの引張強度にほぼ比例する。
- (3)最大の除去速度を得るための最適なノズル回転数が存在する。

第7章では、水溶性天然ガス井用塩化ビニル製ケーシングパイプの原位置パーフォレーション技術の開発を目的とし、水位1,000mまでの深度に相当する環境水圧条件において、ストレートノズルおよび広範囲の角度のホーン型キャビジェットノズルを用いたパーフォレーション試験を行い、パーフォレーション性能に及ぼす環境水圧および各種パラメータの影響について検討し、次の主な知見を得た。

- (1)吐出圧力98.1MPaのウォータージェットを用いれば水深1,000m相当の水圧下でも塩化ビニルケーシングパイプのパーフォレーションが可能である。
- (2)穿孔面積は環境水圧の増大とともにはじめ増加し最大値を示した後減少する。最大孔面積は吐出圧力の2%から3%の環境水圧で得られる。
- (3)スタンドオフ距離が小さいほど大きな環境水圧まで穿孔可能であるが孔面積は小さい。逆にスタンドオフ距離が大きいと穿孔可能な環境水圧は小さいが孔面積は大きくなる。
- (4)ホーン開き角度が半角で15°のホーン型ノズルが最も効果的であり、ストレートノズルに比べて格段に大きな穿孔面積が得られ、限界環境水圧も大きい。
- (5)ホーン型ノズルのホーン長さは、ノズル径の4倍程度まで短くすることができる。
- (6)高環境水圧下での塩化ビニルパイプに対する穿孔は、主としてキャビテーション作用による。穿孔に有効なキャビテーション領域は、環境水圧の増大とともに半径方向に広がり噴流中心軸方向に小さくなる。また、ホーン型ノズルではストレートノズルに比べ半径方向の広がりが大きく、特にホーン開き角度が10°から20°では半径方向、軸方向ともに大きくなる。

第8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ウォータージェット技術の可能性を示した。

審査結果の要旨

地殻工学および資源工学の分野においては、エネルギー開発や様々な地下利用技術の展開のために無人化・自動化掘削技術が求められている。著者は、このための技術として水中ウォータージェットに注目し、地下岩盤に対するウォータージェット技術の実用化のための基礎研究ならびに現場に対応した応用研究を行なった。本論文は、これらの成果をまとめたもので全編8章より成る。

第1章は緒論である。

第2章と第3章では、それぞれ、気中および浅い水中での岩石類に対する切削性能に関する研究を行い、任意のスタンドオフ距離に適用可能な気中と水中に共通な新しい実験式を提案するとともに、気中、浅い水中とも、切削深さは衝突力の平均値よりもその振幅成分とよく対応することを見いだした。これらは有用な知見である。

第4章では、溶結凝灰岩に対する高圧水環境での切削性能は、環境水圧とともに切削深さが急激に減少する低い環境水圧領域と切削深さが環境水圧に依存せずほぼ一定となる高い環境水圧の領域に分かれることを初めて明らかにし、前者の領域ではキャビテーション壊食が重要な役割を果たしていることを示した。これらは非常に重要な知見である。

第5章では、浅い水中での溶結凝灰岩に対する切削性能に関し、ホーン型ノズルを用いることによりストレートノズルに比べて特に切削体積に関して大きな切削性能が得られることを明らかにした。

第6章では、回転型ノズル装置によって鋼製パイプ内壁を損傷することなく地熱スケールを完全に除去できることおよび最大の除去速度を得るための最適なノズル回転数が存在することを明らかにした。

第7章では、高圧水環境での水溶性天然ガス井用塩化ビニル製ケーシングパイプのパーフォレーション性能に関し、従来の常識にない半角 15° のホーン型ノズルが最も効果的であることを見いだすと同時に、ストレートノズルに比べて飛躍的に大きな穿孔面積が得られかつ限界環境水圧も大きくなることを明らかにした。これらは、工学的に有用な知見である。

第8章は結論である。

以上要するに、本論文は、ウォータージェットの岩石類、スケールおよびケーシングパイプに対する水中での切削・除去・穿孔性能を明らかにし、その性能向上法を示したものであり、資源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。