消防用ウォータージェットカッターシステムの開発と性能試験

Developments of Water Jet Cutter System and Its Performances for Fire Fighting Rescue

○ 正 井上 文宏 (大林組) 正 土井 暁 (大林組) 正 一柳 健 (菊池製作所)
正 片倉 寛 (東京工科大) 学 齊藤 淳寛 (東京工科大)

Fumihiko INOUE, Satoru Doi, Obayashi Corporation, inoue.fumihiko@obayashi.co.jp
Ken ICHIRYU, Kikuchi Seisakusyo
Hiroshi Katakura, Atsuhiko Saito, Tokyo University of Technology

Under the conditions of combustible gas, the rescue operations might be much delayed because the engine cutters that the sparks are generated can not be used as rescue tool. On the other side, as a high pressure water jet is able to cut the obstacles for rescue maintaining the explosion-proof and lower vibration, it is extremely suitable under those conditions, and such a useful development is expected. In this study, Water Jet Cutter System that can be operated at high speed cut under combustible gas has been developed and the practical use of this system has been examined. The system is composed of the field vehicle robot and the water jet cutter. When the disaster takes place, the vehicle robot approaches the rescue site while getting over rubbles, and the water jet cut off the collapsing material. This report describes the evaluations of operating performance for the field vehicle robot and perforating and cutting performance for the water jet cutter to construction materials.

Key Words: Fire Rescue, Water Jet Cutter, Abrasive Suspension Jet, Field Robot Vehicle, Performance Evaluation

1. 結 言

地震などの自然災害、火災や交通事故など災害発生時には、救助が難航すると大事故に繋がり、多くの被災者がでる場合がある。例えば、近年発生した電車事故では、脱線した列車が駐車場に突入し、駐車中の車のガソリンが大量に漏れたことで、火花が発生するエンジンカッターが使えず、救出が難航して、多くの犠牲者が出るに至っている⁽¹⁾。また、震災などによりビルなどの崩壊や土砂崩れが発生した災害現場では削岩機などの大型重機や爆薬などの振動の発生する機材が使用できず、そのため迅速な救助活動の実施が非常に困難となることもある⁽²⁾。さらに、今後身近になると予想できる燃料電池も水素や天然ガスなどの可燃性ガスが使用されるため、小規模の事故であっても使用できる機材が限定され、救助活動はより困難になると予想される⁽³⁾。このような災害状況下では、安全に配慮した特殊機材の研究が必要であり、特に可燃性蒸気が存在する雰囲気下でも使用でき、大きな振動も発生しない高速切断器具の開発が求められている。

ところで、ウォータージェットは超高速の水噴流を使用し、事実上防爆無振動で部材を切断できるという特徴を有している。そのため、上記のような条件下での使用には極めて適しており、その実用化が検討されている⁽⁴⁾。圧力条件を問わずウォータージェットの利用は消防活動における最も一般的な消火方法の一つであるが、日本ではウォータージェットは大部分が消火の為だけに利用され、レスキューにおける障害物の除去には積極的に使用されていない。また、ウォータージェットカッターはレスキューを含めた一連の消火活動に有効に利用できることが予想できるが、一方、ウォータージェットで火元を破碎する消火や蒸散熱による火災室の冷却については適用例がほとんどなく、その効果も解明されていない。そこで、本研究では可燃性蒸気下でも高速切断が可能なウォータージェットカッターシステムの開発を行

Fig. 1 Outline of Water Jet Cutter System

い、実際の災害時でも使用できるシステムの実用化について検討を行う。本報では開発した不整地走行車の稼動性能の確認およびウォータージェットカッターの建築部材を対象とした貫通・切断性能の評価について報告する。

2. ウォータージェットカッターシステム

2.1 システム構成

開発したウォータージェットカッターシステムは、ウォータージェットカッターと2台の不整地走行車⁽⁵⁾から構成される。図1に示すように、不整地走行車は破線で囲んだウォータージェットカッター機器を搭載できる荷台があり、災害現場からは直接可燃性ガスの影響が少なく、給水が可能な場所まで、遠隔操作あるいは手動運転によって機器の搬送を

Fig. 2 Rescue Image using Water Jet Cutter System

なうことを目的としている。システムの概要を図2に示す。一方、ノズル走行車は可燃性ガスの影響が懸念される実際の災害現場における消防活動を行なうこと目的とし、車体からの火花発生を抑制する防爆性能を有している。車体の先端にはノズルが取り付けられており、移動機構を介してノズル端部は自由に移動させることができる。また車体の含めた全てが遠隔操縦によりコントロールすることが可能である。ウォータージェットカッターとハンドガンとを繋ぐ超高压ホースは最長500mまで延長できるため、2台の不整地走行車の機能を分担することにより、可燃性ガスの影響を十分に回避しながら消防作業が進められることを目指している。

2.2 不整地走行および相互稼働試験

災害時を想定した場合、災害現場は災害による不整地と進路を阻む障害物があることが予想されるため、ここでは災害現場の不整地状態を模擬した走行車の遠隔性能による稼働試験を実施した。瓦礫状態はコンクリートブロック破片を積上げて起伏を作り、様々な角度から走行試験を繰り返した。

(1) 不整地走行車

不整地走行車は前後左右の各クローラが独立して操舵できる機能を有しており、不整地走行に適した構造となっている。図3に走行車の稼働状態を示す。走行車のクローラ部が瓦礫の起伏に接触するとクローラ先端部が傾斜し、瓦礫上部に乗り上がる様子が分る(①)。走行車全体が瓦礫の上に乗ると、走行車の左右のバランスが崩れることもあるが(②、③)、個々のクローラは独立して制御されているため、即座に車体全体の姿勢が回復でき、常に安定した走行が実現された(④)。また遠隔自動運転および手動運転による操作性(操舵性能、停止位置精度)も優れており、高さ0.4m程度の瓦礫の段差では、十分に走行が可能であることを確認した。

(2) ノズル走行車

ノズル走行車は前後左右の各クローラの回転方向と速度を制御することにより、走行車の移動方向を操作する。すなわち車体を回転させる場合には、左右の速度比を変えることで対応する。図4に走行車の稼働状態を示す。クローラ部が瓦礫の起伏に接触するとクローラ先端部の抵抗が増すことにより、クローラ全体が上向きに傾斜し、瓦礫の上部に乗り上がることが分る(①)。不整地走行車のクローラは、先端の引揚げが油圧シリンダーを用いて制御されていたが、この走行者ではクローラ自身の動きで傾斜角を調整している点で違いがある。そのため、瓦礫の状態によりクローラの角度が変化していることが分る(②)。走行車全体が瓦礫の上に乗った状態では、各クローラに接触する瓦礫の状態が異なる場合もあるため、車体が左右に振られる時もあるが(③)、全体としては安定した走行が実現されていた(④)。現状のモーター仕様の場合、1辺が100mm角材を重ねた走行試験では、勾配が3:1程度以下であれば十分に走行が可能である。現在、モーターのトルク範囲を考慮しながら、より勾配の大きな不整地でも対応できるように調整されている。

Fig. 3 Performance of Field Robot Vehicle at Rough Ground

Fig. 4 Performance of Explosion Proof Robot at Rough Ground

Fig. 5 Mutual Operating Performance of both Field Robot Vehicle and Explosion Proof Robot at Model Disaster Site

2.3 相互稼働試験

2台の走行車を用いた相互稼働試験の様子を図5に示す。実験では2台の走行車が併走しながら災害現場近傍まで行き、

その後ノズルガンを搭載したノズル走行車が災害現場に到着して、ウォータージェットカッターによる切断作業を行うことを想定する。後述するコンクリートの切削性能試験（自動送り）では、想定現場に設置した架設施設内部にコンクリート試験体を設置して、走行車の稼動と合わせた実験を行なった。相互稼動試験では、遠隔操作によって2台の走行車を適当な間隔を保ちながら併走することが実現でき（①）、またノズル走行車を所定の仮設施設にほぼ正確に設置できた（②、③）。さらに、不整地走行車に搭載したウォータージェットポンプを起動し、所定のジェットを噴射しながらノズルガンを自動送りで移動させて、部材の切削が可能であることを確認した。

3. ウォータージェットカッターの切削実験

3.1 ウォータージェットカッターの概略

使用したウォータージェットカッター装置のシステム概略を図 6(a)に示す。システムは水を超高圧に増圧するポンプモジュール(b)、研磨材を超高圧水と混合させるサブライモジュール(c)、およびスラリーを噴射するハンドガン(d)から構成される。ウォータージェットの研磨剤混合方式は、いわゆるアプレシブ・サスペンション・ジェット方式であり、研磨剤を充填した耐圧タンクに超高圧水を引き入れ、混合されたスラリージェットを先端ノズルより噴射させる。ウォータージェットカッターに、その仕様を表 1 に示す。

3.2 実験および測定方法

消防用ウォータージェットカッターの使用目的は、(1)部材に開口を穿孔して内部にジェットを噴射し、消火作業の迅速化を行うこと、(2)建物内部に居残った人々を救出するための動線確保するため、少なくとも施錠された部位を解く範囲（手の先が入る程度大きさ）まで部材を切断することが要求されている。

本実験はまずハンドガンのノズルを固定し、ノズルを作業員によって回転させて部材を破断する切削性能実験⁽⁶⁾とノズルの移動装置を用いてノズルを一定の速度で移動させて円状に切削する実験⁽⁷⁾を行い、その作業性も検討した。図 7 に各に対する実験条件と実験状況の様子を示す。実験は研磨剤が水噴流に混合されて吐出され始めた時間とし、所要の時間毎に切削された円の 8 点について深さを計測し、その切削深さを平均して、切断深さとした。

3.3 実験結果

3.3.1 貫通および切断性能結果

代表的な被切削材料の実験状況を図 8 に示す。石膏ボードやベニヤ板等の軟弱仕上げ部材は、水のみでジェットでも瞬時に貫通、切断できることがわかる。切断面は極めて良好である。ワイヤーメッシュが入った強化ガラス材は、ワイヤーが繋ぎ材となるため円状に切断できるが、ワイヤーがない強化ガラスはジェットの僅かな切削キズにより、ガラスの応力バランスが崩れて一瞬に破壊することが確認された。火災時には火災区画の急激な開口変化によってフラッシュオーバーが発生する場合があるため、ガラスの貫通・切断は避けるべきであろう。

一方、建物の躯体材料として使用されるブロックやコンクリート壁、また建物の防火戸として利用される鋼製板などは、水のみではほとんど切削することはできず、研磨剤を混入させた。厚さ 100mm の鉄筋コンクリート壁は約 10 分、厚さ 10mm

(a) Flow of Water Jet Cutting System

(b) Pump Module

(c) Slurry Module

Fig.6 Water and Slurry Circuits of Water Jet Cutter

Table 1 Specification of Water Jet Cutter

Power	7kW (Diesel Engine)
Working Pressure	690bar
Outlet Velocity	334m/s (Flow rate 5.5L/min)
Abrasive	Olivin sand (Capacity 12L)
Discharge Hose	50m (Max 500m)
Nozzle Diameter	0.5mm
Total Weight	330kg

(a) Manual Operation

(b) Automation Operation

Fig.7 Cutting Method by Manual and Automation Operations

の鉄板は約5分で貫通できることが確認されたが、部材を完全に切断するには、さらに約3程度の時間が必要となった。

以上のように、軟弱仕上げ部材等の貫通、切断性能は極めて良好であることが確認されたが、建物の躯体部材を対象とした場合には、貫通性能のみが実的に有益と想定される。今回使用したウォータージェットの出力は、部材を完全に切断させるためには時間的に不十分であると考えられる。

3.3.2 各被切削部材の切断時間

図9に切削深さと時間の関係をノズルの角速度 ω と切断開口径 D を用いて無次元化した結果を示す。ここで、無次元切削深さ d/D 、無次元時間 t/T とし、 $D=0.12\text{m}$ 、 $T=2/\omega$ を使用した。対数軸で示した各部材の切断深さは切削時間にほぼ比例する関係があり、その傾きはほぼ0.5に等しくなっている。すなわち、切断深さは切削時間の平方根に比例し、切断深さが大きくなるほど切削時間が必要となり、ノズルの移動方法には関係がないことが分る。ただし、ノズル回転速度が速くなる（例えば： $\omega=0.63$ ）とジェットの切削能力が低下するため、他の場合とはことなる値をとる。ノズルの送り速度の低下限界を推定できることがわかる。

またコンクリートなどの複合部材では、部材の種類や厚さにも影響されないことが分かる。実験ではノズルのスタンドオフ距離は一定であるため、切断深さが深くなるに従いジェットの切断力は弱まり、ジェットが部材に接触する時間が支配的となるため、部材の種類にはあまり影響されなくなると推察される。ただし鋼製板については部材特性が他とは異なるため、上記の関係には適合しないものと予想される。この結果、本実験条件の範囲では、鋼製板を除けば切断深さに対する切断時間のある程度推定することが可能となった。

4. まとめ

可燃性蒸気下でも高速切断が可能なウォータージェットカッターシステムの性能評価として、2つの走行車の不整地走行と相互稼働試験、および切削実験を実施した。

以下の結果を得た。

- ・走行性能については当初の仕様を満たす結果が得られ、また2台の相互稼働試験では災害現場を想定したウォータージェットカッターの適用状況を確認することができた。
- ・切削実験ではノズルの移動を自動化することで、切削深さの詳細なデータを取得した。無次元化した切削深さと切削時間の関係ではその傾きはほぼ0.5に等しい関係が得られ、部材の種類や厚さにも影響されないことが確認された。

今後はウォータージェットカッターシステムの防爆化や高性能化の検討が必要と思われる、適時対応して行きたい。

なお、本研究の遂行に対して、日本ウォータージェット学会消防プロジェクトの関係者から多大な協力を得た。また本研究の一部は、消防庁消防防災科学研究推進制度の助成を受けて実施した。ここに記して関係各位に謝意を表す。

文 献

- [1] 後藤昇弘 他, 鉄道事故調査報告書 RA2007-3-1, 航空・鉄道事故調査委員会, pp. 162 (2007).
- [2] 2007年版消防白書, 総務省消防庁, pp. 449-452 (2007)
- [3] 茅陽一 他, 燃料電池実用化戦略研究会報告, 燃料電池実用化研究会, pp. 21 (2001).
- [4] 片倉寛, WJTSJ 消防防災科学技術研究特別プロジェクトについて, 2007年度ウォータージェット技術年次報告会, pp. 25-27 (2008).
- [5] 一柳 健, "ウォータージェット用親子ロボット車両の開発", 2007年度ウォータージェット技術年次報告会, pp. 29-32, (2008).

Fig.8 Cutting of Building Materials by Water Jet Cutter

Fig. 9 Relation of Non-dimensional Cutting Time and Cutting Depth

(2008).

- [6] 土井 暁, 井上文宏, 一柳 健, 片倉 寛, "消防用ウォータージェットカッターシステムの性能評価(不整地走行車の稼働性能および建築材料の貫通・切断性能)", 日本ウォータージェット学会論文集, Vol. 25, No. 1, pp.28-35, (2008).
- [7] 井上文宏, 土井 暁, 一柳 健, 片倉 寛, 齊藤淳寛 "ウォータージェットカッターシステムの性能評価について (第2報, 不整地走行車および防爆ロボットによる相互稼働試験)", 2008年度ウォータージェット技術年次報告会, pp. 75-78, (2009).