

ウォータージェット工法による切断技術の開発（その1） 基礎実験および鉄筋コンクリート構造物の切断工法の開発

The Development of Water-Jet Cutting System (Part1) A Fundamental Study and a Development of Cutting System on Reinforced Concrete Structures

武内 義夫*
Yoshio Takeuchi

宮下 剛士**
Takeshi Miyashita

大原 直***
Tadashi Ōhara

片野 彦一****
Hikoichi Katano

牧野 清*****
Kiyoshi Makino

神谷 宏*****
Hiroshi Kamiya

要 約

構造物を切断・解体する技術は年々進歩を遂げ、その手法もいろいろ開発されてきている。そこで、ウォータージェットを用いた切断技術の開発を行った。この技術は、ジェット（超高压）ポンプで増圧したウォータージェットに研磨材を混入し、ノズルより噴射して構造物を切断するアブレシブジェット工法である。この切断能力を確かめるため、フローインターナショナル社製ポンプ40DQ および40ED 型を使用し、研磨材にガーネット#36を用いて無筋コンクリート、鉄筋コンクリート、鋼板を対象に実験を行った。この結果、切断条件にもよるが、コンクリート厚さ60cm以上、鋼板厚さ7.5cm以上の切断が可能であることが確認された。さらに、この切断能力を用いて建築のリフォーム工事（壁・スラブ）を対象とした切断工法の開発を行った。また、研磨材を使用せず、ウォータージェットのみに用いて、はつり・剝離、切削・削孔等に用いるランス工法についても実験を行った。

実験より得られた、広範囲な用途に適用可能な西松式ウォータージェット工法（以下、ARA-JIN 工法と称す）の開発経過を報告する。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 実験装置
- §3. 基礎実験
- §4. 実用化への応用実験
- §5. おわりに

§1. はじめに

近年、建築および土木分野において、構造物の切断・

解体にウォータージェット（以下 WJ と称す）を用いる例が多くなっている。また、将来予想される原子力発電所の原子炉建屋解体に WJ の利用も検討されている。

WJ の利用には、ジェットポンプで発生させた WJ に研磨材を混入し、大幅に切断能力を高めたアブレシブジェット工法と、WJ のみ使用し、コンクリート表面のはつり、建物外装の剝離、RCD ダムのグリーンカット、トンネル切羽の切削・削孔等に用いるランス工法などがある。本報で主に述べるアブレシブジェット工法の特徴は、以下のとおりである。

- ① 切断時に、粉塵や振動をほとんど伴わず、簡易なカバーで切断後の WJ や線り粉の回収ができ、切断音の低騒音化が可能である。
- ② 切断面がきれいで、任意の形状に切断できる。また、切断部は高熱を持たず、材料の変質を伴わない。

*技術研究部原子力室係長
**技術研究部原子力室
***技術研究部土木技術課係長
****技術研究部建築技術課副課長
*****技術研究部技術研究所係長
*****技術研究部技術研究所副所長

- ③ 吐出水量が比較的少なく、また吐出反力が小さいので切断装置の小型軽量化が図られ、操作性がよい。
- ④ 強度や材質の異なる切断対象物に対応できる。また、切断深さも自由に調整できる。
- ⑤ 気中のみならず、水中作業にも対応できる。

そこで、アブレシブジェット工法の基本的切断能力を把握するため、無筋コンクリート・鉄筋コンクリート・鋼板を対象にした基礎実験と、この工法を用いて実際に建物の壁およびスラブを切断し、リフォーム工事の実用的な施工法を会得するための応用実験を行った。この応用実験では、周辺機器の開発および近隣の環境に及ぼす影響を調べるため、騒音・振動の測定を行った。なお基礎実験では、アブレシブジェット工法のみならず、WJのみ使用するランス工法でも実験を行い、ARA-JIN工法の開発を行った。

§ 2. 実験装置

2-1 装置の概要

基礎実験および実用化への応用実験で共通に使用する実験装置は、WJを発生させるジェットポンプ、WJをノズルまで導く高圧ホース、WJを噴射するノズル、切断対象物に対し自由自在にノズルを動かすノズル移動装置、アブレシブジェット工法で用いる研磨材供給装置などがある。

リフォーム工事を対象とした実用化への応用実験では上記以外に、切断部に設置する防音カバー、構造物切断後、WJおよび練り粉を受け止めるキャッチャー、これらを吸引し回収・廃棄する真空装置および沈殿槽、低騒音化を図るための防音ボックスなどがある。

(1) ジェットポンプ

構造物の切断・解体、岩の切削・削孔等に使用するジェットポンプは、吐出圧力2000kgf/cm²以上、吐出水量10ℓ/min以上の能力を有する必要がある。実験に使用したジェットポンプは、米国フローインターナショナル社製の40DQ及び40ED型の2機種である。いずれも増圧器を内蔵しており、油圧をコントロールすることにより、任意の吐出圧力が設定できる。40DQ型は、最大吐出圧力2800kgf/cm²、最大吐出水量21.2ℓ/minで動力はエンジンであり、40ED型は、最大吐出圧力2800kgf/cm²、最大吐出水量10.6ℓ/minで動力はモーターである。

(2) 高圧ホース

ジェットポンプで発生させたWJをノズルまで導くためには超高圧ホースを用いる。長さは15mで、フレキシブルで作業性がよく、実用圧力3850kgf/cm²まで耐えら

れる。ホースは、破損によるWJ噴出を防止する機能を備えており、ごく少量の低圧水の漏れでチェックでき安全性の高いものとなっている。ジェットポンプとノズルの距離がある場合は、作業ヤードまでステンレスパイプを配管することにより対応できる。

(3) ノズル

ノズルは、研磨材を混入するアブレシブジェットと、WJのみ使用するランスノズルなどがあり Fig. 1 に形状を示す。アブレシブジェットは、ジェットポンプで発生させたWJをノズルホルダー内のオリフィスで直径約1mm以下に絞り、これに研磨材を混入し、コンクリートのみならず、鉄筋コンクリート、鋼板などの切断にも用いる。ノズルの材質は耐摩耗性に優れたタングステンカーバイドを使用している。

ランスノズルは、WJを複数孔を持つノズル内のオリフィスで直径約0.7mm以下に絞り、ノズルを回転させることにより、帯状にコンクリート等のはつり・剥離、岩等の切削・削孔に用いる。

(4) ノズル移動装置

ノズル移動装置は、サーボモーター駆動のノズルを保持する装置である。リモートコントロールにより、ノズルを水平方向1.5m、鉛直方向2.0mの範囲で、移動速度0～100cm/minで自由に移動できる。また、オートストップ機構の採用により安全性の高い装置となっている。

(5) 研磨材供給装置

研磨材供給装置は、アブレシブジェット工法で、研磨材を供給する装置である。供給方法は、WJによる吸引力を利用している。供給量は、ホッパー吐出部の開孔面積を変化させることにより調整する。装置とノズルは、研

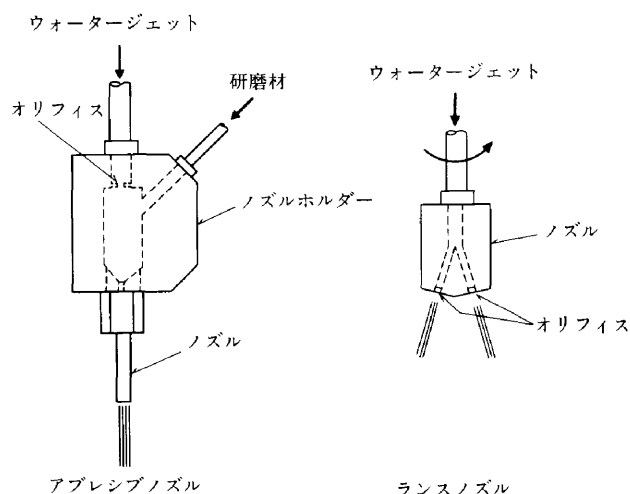


Fig.1 ノズル形状

磨材供給ホースで結ばれている。

(6) 防音カバー

防音カバーは、リフォーム工事で、壁およびスラブを切断する際、ノズル側の軀体面にアンカーで取り付ける鋼製カバーである。これは、切断中の WJ や繰り粉の跳ね返り防止、これらの回収および切断音の低騒音化に役立っている。カバー中央のノズル移動部には、ノズルを挟みこむかたちで、ゴムガasketを装着している。（Fig. 13 参照）

(7) キャッチャー

キャッチャーは、構造物を挟んで、防音カバーと対になるように、軀体面にアンカーで取り付ける鋼製カバーである。これは、切断後の WJ や繰り粉の回収および切断音の低騒音化に役立っている。キャッチャー内側には、切断後の高圧なアブレシブジェットを受け止めるため、耐摩耗性に優れたセラミックス板を一行に貼っている。

(8) 真空装置および沈殿槽

切断によって防音カバーおよびキャッチャー内で発生した WJ や繰り粉は、真空装置によって吸引される。これらは沈殿槽に導かれ、固形物と水に分離され、廃棄される。

§ 3. 基礎実験

3-1 切断・切削要素

アブレシブジェット工法およびランス工法の切断、切削能力を把握するため、これにかかわる基本的な要素別に切断および切削実験を行った。

実験はアブレシブジェット工法を主に行い、その対象試験体は無筋コンクリート、鉄筋コンクリート、鋼板とした。ランス工法は、無筋コンクリートのみとした。

アブレシブジェット工法で考慮している切断要素は、以下の通りである。

- ① 研磨材使用の有無（ガーネット #36）
- ② オリフィス径：25/1000～40/1000 (inch)
[0.625～1.0 (mm)]
- ③ 吐出圧力：1000～2370 (kgf/cm²)
- ④ ノズル移動速度：3～15 (cm/min)
- ⑤ スタンドオフ：0.5～3 (cm)
(ノズル先端から切断物までの距離)
- ⑥ 研磨材供給量：1～3 (kg/min)
- ⑦ トラバース回数（切断回数）：1～9 (回)
- ⑧ ノズル角度：90°, 75°, 60°
(ノズルが切断物となす角度)
- ⑨ コンクリート強度： $\sigma=200\sim400$ (kgf/cm²)

- ⑩ 鉄筋の有無：D10-@100～D35-@100

ランス工法で考慮している切削要素は、以下のとおりである。

- ① オリフィス径：25/1000 (inch)
- ② ノズル孔数：2 (孔)
- ③ ノズル孔角度：30°, 45°
- ④ 吐出圧力：1500～2370 (kgf/cm²)
- ⑤ ノズル移動速度：5 (cm/min)
- ⑥ スタンドオフ：1 (cm)
- ⑦ トラバース回数：1～3 (回)
- ⑧ コンクリート強度： $\sigma=300$ (kgf/cm²)

なお、ジェットポンプの吐出水量は、ポンプの性能上オリフィス径と吐出圧力より決定され、以下の式より求められる。

$$Q=0.7\times29.8\times\sqrt{P}\times d^2\times3.785$$

Q ：吐出水量 (ℓ/min) P ：吐出圧力 (psi)

d ：オリフィス径 (inch)

3-2 切断装置

ノズル移動装置を、高さ調整用の架台に設置し、切断用試験体は、衝撃吸収用の水槽の上に載せた。水槽内には水を張り、WJ の切断後のエネルギー吸収のため、底には鋼板および H 鋼を並べた。切断装置の概観を Photo 1 に示す。

3-3 アブレシブジェット工法実験結果

(1) 無筋コンクリート切断試験

コンクリート強度 $\sigma=200\sim400$ (kgf/cm²) の試験体 (800×300, $h=600$) を用いて、WJ のみの場合および研磨材（ガーネット #36）を使用した場合の両者について、各種要素を変化させて切断試験を行い、切断深さの測定および切断形状の観察を行った。切断深さの測定は、端部の20mmを除外し残りの部分を20mm間隔で測定し、その平均値を求めた。

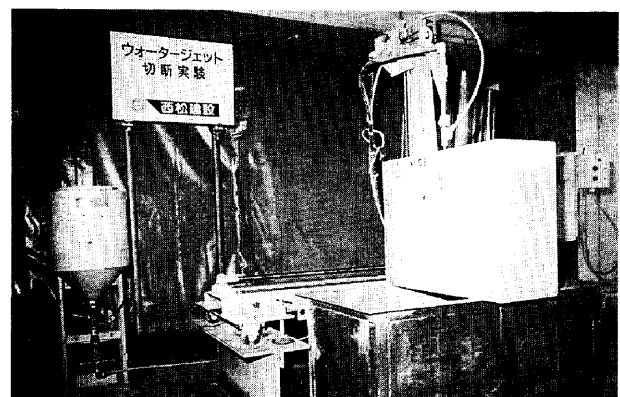


Photo 1 切断装置

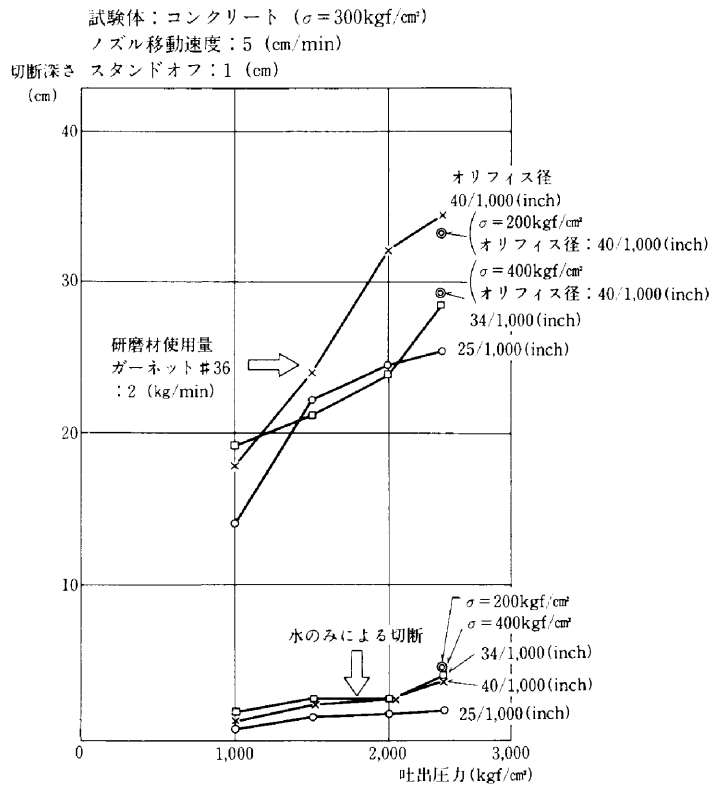


Fig.2 オリフィス径・吐出圧力と切断深さの関係

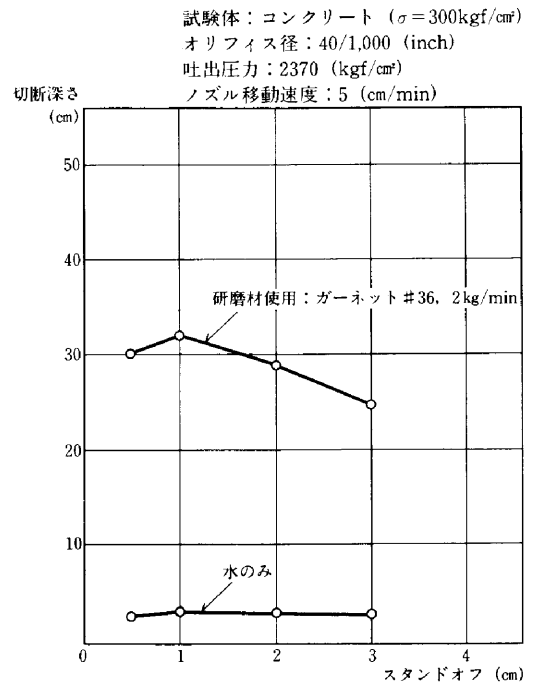


Fig.4 スタンドオフと切断深さの関係

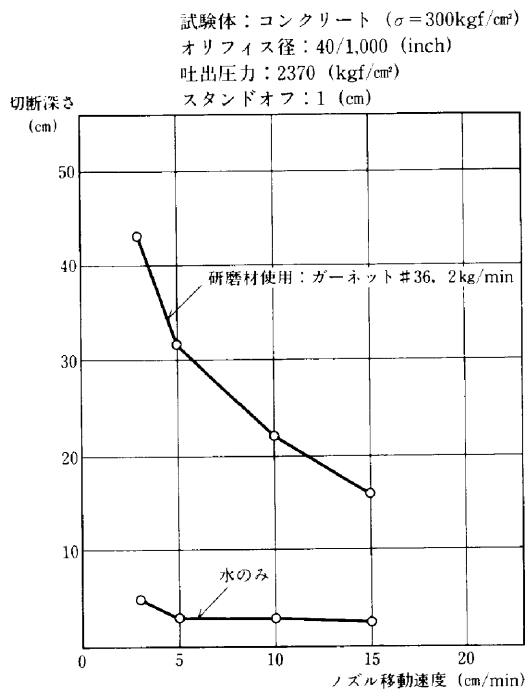


Fig.3 ノズル移動速度と切断深さの関係

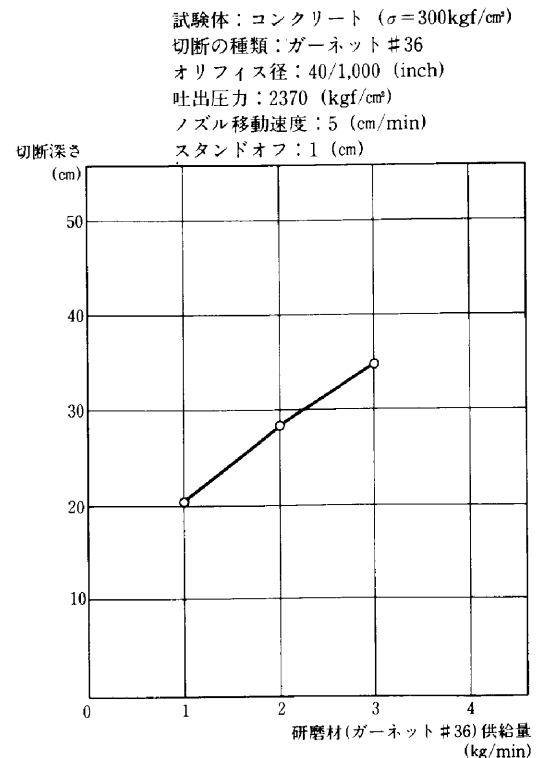


Fig.5 研磨材供給量と切断深さの関係

実験により得られたオリフィス径・吐出圧力と切断深さの関係、ノズル移動速度と切断深さの関係、スタンドオフと切断深さの関係、研磨材供給量と切断深さの関係を Fig. 2～5 に示す。切断試験時の状況を Photo 2 に示す。

(2) 鉄筋コンクリート切断試験

コンクリート強度 $\sigma=300(\text{kgf/cm}^2)$ 、鉄筋径 D10および D35の鉄筋コンクリートの試験体 (1000×200 , $h=600$) を用いて、切断試験を行った。なおノズル角度 75° の場合、トラバース回数が2回以上の繰り返し切断の場合は、各トラバースごとに、 $+75^\circ$ 、 -75° の角度で交互に切断を行った。切断深さの測定は、無筋コンクリートの場合と同様にしている。ただし、鉄筋コンクリートの場合は、鉄筋が切断されずに残った場合などは、切断形状が無筋コンクリートの場合とは著しく異なり、切断深さの

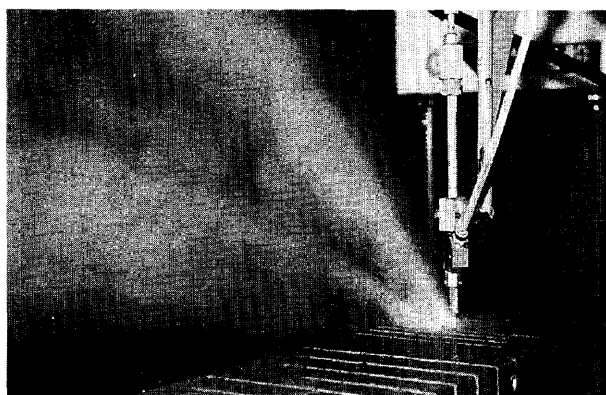


Photo 2 コンクリートブロック切断状況

平均値の持つ意味が違ったものとなる。鉄筋コンクリートの場合は、切断形状と合わせて検討しなければならない。

実験より得られた切断形状の一例を、Fig. 6～7 に示す。また D10の試験体を用いて、ノズル角度とノズル移動速度をパラメータとし、トラバース回数と切断深さの関係を Fig. 8 に示す。

(3) 鋼板切断試験

SS41の鋼板で試験体 (250×100 , $h=75$) を製作し、切断試験を行った。

実験より得られた、ノズル移動速度と切断深さの関係、吐出圧力と切断深さの関係を Fig. 9～10 に示す。

3-4 ランス工法実験結果

(1) 無筋コンクリート切削試験

コンクリート強度 $\sigma=300(\text{kgf/cm}^2)$ の試験体 (800×600 , $h=300$) を用いて、切削試験を行った。

実験より得られた切削深さの一例を、Fig. 11 に示す。

3-5 考察

アブレシブジェット工法およびランス工法の基礎実験より、以下の事項が確かめられた。

(1) アブレシブジェット工法

① 無筋コンクリート、鉄筋コンクリート、鋼板の切断に非常に有効で、切断条件にもよるが、無筋コンクリートで厚さ60cm以上、鋼板で7.5cm以上の切断能力が確かめられた。

② 吐出圧力、吐水量、研磨材供給量、ノズル移動

実 験 条 件			
切 断 方 法	アブレシブジェット	ノズル移動速度	5 (cm/min)
試 験 体	鉄筋コンクリート $\sigma=300$, D10	スタンドオフ	1 (cm)
オリフィス径	40/1,000 ϕ (inch)	研磨材供給量	2 (kg/min)
ノズル径	3.9 (mm)	トラバース回数	1 (回)
吐 出 圧 力	変更要素		

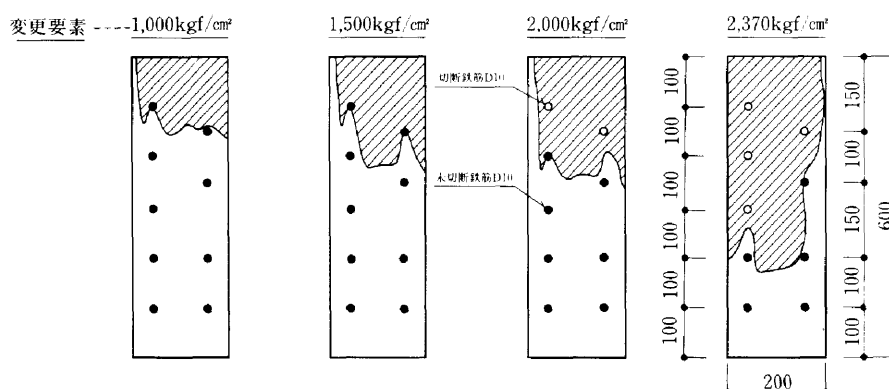
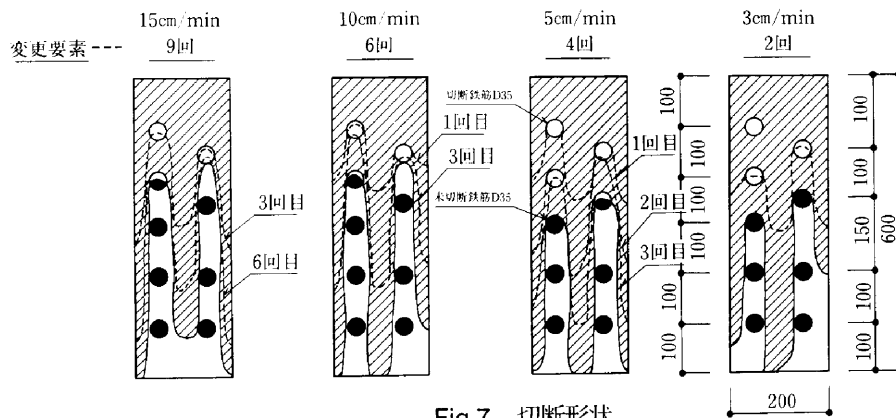
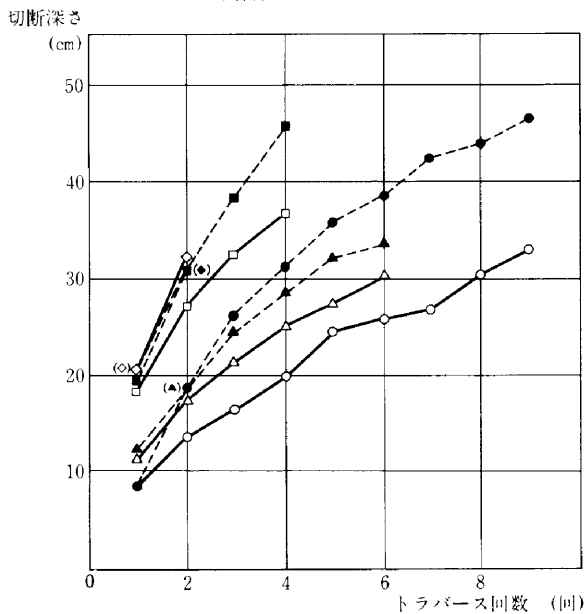


Fig.6 切断形状

実 験 条 件			
切 断 方 法	アブレシブジェット	ノズル移動速度	変更要素
試 験 体	鉄筋コンクリート $\sigma=300$, D35	スタンドオフ	1 (cm)
オリフィス径	40/1,000 ϕ (inch)	研磨材供給量	2 (kg/min)
ノズル径	3.9 (mm)	トラバース回数	変更要素
吐出圧力	2,370 (kgf/cm ²)		



試験体：鉄筋コンクリート ($\sigma=300$, D10)
 オリフィス径：25/1,000 (inch)
 ノズル径：3.1 (mm)
 吐出圧力：2,370 (kgf/cm²)
 スタンドオフ：1 (cm)
 研磨材：ガーネット #36, 2kg/min



	ノズル角度	移動速度		ノズル角度	移動速度
○	90°	15cm/min	●	75°	15cm/min
△	"	10 "	▲	"	10 "
□	"	5 "	■	"	5 "
◇	"	3 "	◆	"	3 "

Fig.8 トラバース回数と切断深さの関係

試験体：鋼板
 オリフィス径：40/1,000 (inch)
 ノズル径：3.9 (mm)
 吐出圧力：2,370 (kgf/cm²)
 スタンドオフ：1 (cm)
 研磨材：ガーネット #36, 2kg/min

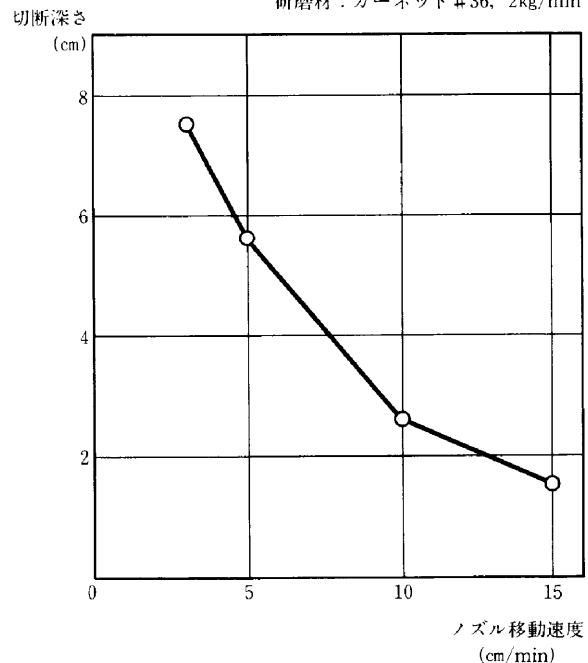


Fig.9 ノズル移動速度と切断深さの関係

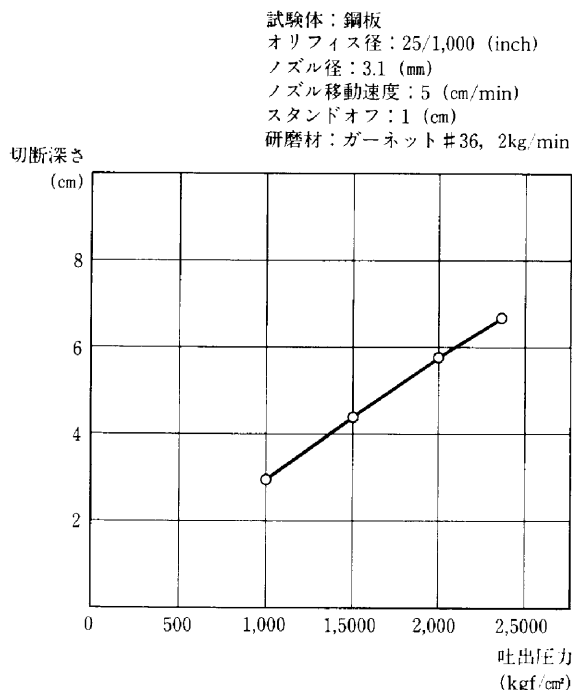


Fig.10 吐出圧力と切断深さの関係

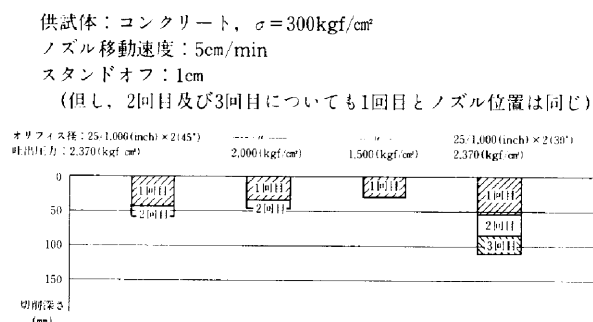


Fig.11 切削深さ

速度などの切断要素の組合せにより、任意の切断深さを得ることができる。

- ③ スタンドオフは、1cm程度が最適である。
- ④ 通常使用するコンクリート強度の範囲内においては、切断深さに差がみられない。
- ⑤ 切断対象物が鉄筋コンクリートで、特に鉄筋の被りが大きいとか、太径の鉄筋を使用していると、鉄筋が切断されずに切れ残る場合もある。その対策としては、ノズル角度を各トラバースごとに $\pm 75^\circ$ 程度に傾けることにより切断効率を高めるとか、ノズル移動速度および研磨材供給量の調整を行う必要がある。

(2) ランス工法

- ① 切削対象物が無筋コンクリートの場合、ノズル孔角度が 45° より 30° の方が切削能力が若干高い。

§ 4. 実用化への応用実験

4-1 目的

WJを用いて、鉄筋コンクリート構造物等の切断・解体工法を確立するため、アブレシブジェット工法の基礎実験で得られた切断特性を踏まえて切断システムの開発を行った。今回は、建物のリフォーム工事を対象にした壁およびスラブの切断工法の開発について報告する。

本実験における主な検討項目は以下のとおりである。

(1) 切断装置の検討

- ① ノズル移動装置（構造、ノズルの移動範囲および速度）
- ② 防音カバー（構造、低騒音化対策、固定方法）
- ③ キャッチャー（構造、低騒音化対策、固定方法、セラミックス板の耐摩耗性）
- ④ 回収装置（吸引力、繰り粉処理方法）
- ⑤ システム（運用効率、安全性、環境対策）

(2) 切断時の騒音および振動に関する検討

- ① 切断時の騒音および振動の性状
- ② 防音カバーおよびキャッチャーを取り付けた場合の騒音性状
- ③ 更に低騒音化を図るため、防音カバーおよびキャッチャーの外側に防音ボックスを設置した場合の騒音性状

4-2 切断システム

切断装置のシステムを Fig. 12 に示す。

実際の建物を切断するため、基礎実験では使用しなかった防音カバー、キャッチャー、回収装置、防音ボックスを新たに用いた。

アブレシブジェットの切断時の騒音は測定の結果110dB前後であり、マンション・オフィスビル等のリフォーム工事を行う場合、この騒音の低減を図らなければならない。そこで防音カバーとキャッチャーを密閉型とし、躯体との取り付け部にはゴムパッキンを使用することにより、この騒音を約90dBまで低減させた。

特に病院・ホテル等のリフォーム工事では、さらに低騒音化を図るため、防音カバーとキャッチャーの外側に移動可能な防音ボックスを設置した。これにより騒音を約70dBまで低減することができた。この概観を Photo 3 に示す。またこの工法は測定の結果、ほぼ無振動であるため、特に振動をきらう、FA・OAの工場・研究所等のリフォーム工事に最適である。さらに防音カバーとキャッチャーの設置により、WJや繰り粉の飛散が無く、施工ヤードを汚さずに作業が行える。

4-3 切断実験

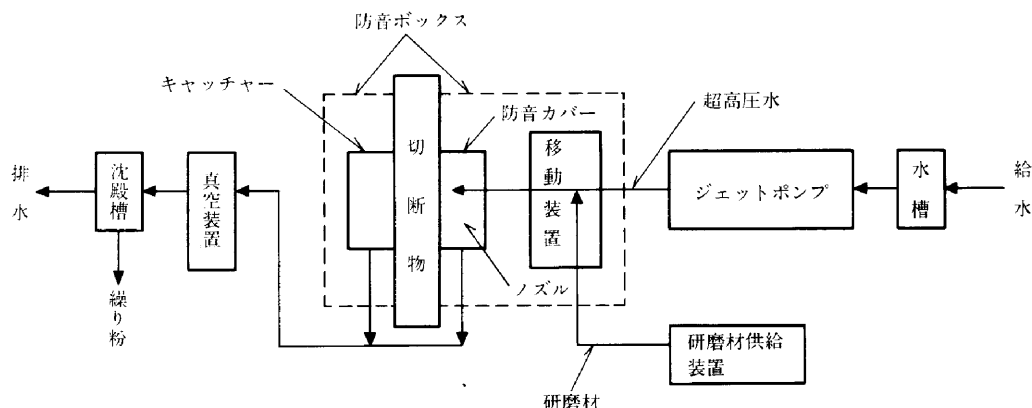


Fig.12 切断システムフロー

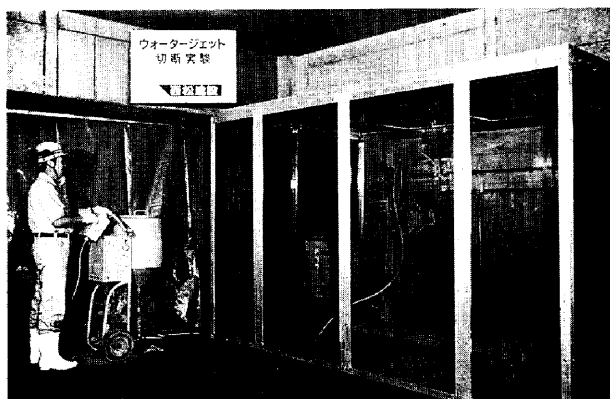


Photo 3 切断システム全景

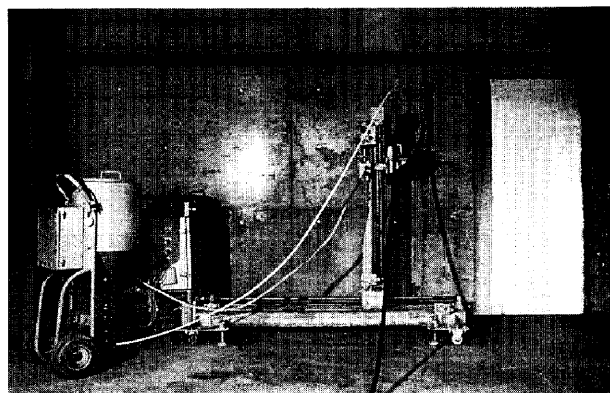


Photo 4 壁切断開口部

実際の建物の壁およびスラブの切断を行った。壁厚は180mm、配筋はタテ・ヨコ共 D10-@200ダブル、スラブ厚は150mm、配筋はタテ・ヨコ共 D10, D13-@200~250ダブルで、コンクリート強度は共に $\sigma=360$ (kg f/cm²) であった。

切断要素は、基礎実験で得られたデータがそのまま生

かされ、オリフィス径34/1000inch、吐出圧力2370kg f/cm²、ノズル移動速度5 cm/min、研磨材供給量2 kg/minを基本とした。

また、今回開発した周辺機器も十分機能を発揮するのが確かめられた。

壁切断開口部の一例を Photo 4 に示す。

4-4 壁切断時の騒音測定

(1) 測定方法

JIS C 1502に定めた指示騒音計を使用して、「JIS Z 8731騒音レベル測定方法」に準じて測定を行った。マイクロホンの高さは、地盤より1.2mとし、聴感補正回路はA-特性とし、レベルレコーダの動特性は、速い (fast) として行った。

実験工程のサイクルは、次のとおりである。

ジェットポンプ始動⇒真空ポンプ始動⇒切断開始⇒停止とし、全工程をデータレコーダに収録した。

(2) 測定項目

測定は、騒音対策なし(源音)、一重構造(防音カバー+キャッチャー)、二重構造(一重構造+防音ボックス)の3項目とした。

(3) 消音材料

①遮音材

防音カバー本体の主要部材は、PL-3.2mmを使用し、ノズルが移動する開口部には、ゴムガasketを設置した。なお防音ボックスには、アクリル板の厚さ6mmを使用した。

②吸音材

防音カバー内には、厚さ30mmのグラスウールにパンチングメタル、厚さ1.6mmで開口率28%を使用し、防音ボックスにもグラスウールを貼った。

消音対策装置を Fig. 13 に示す。

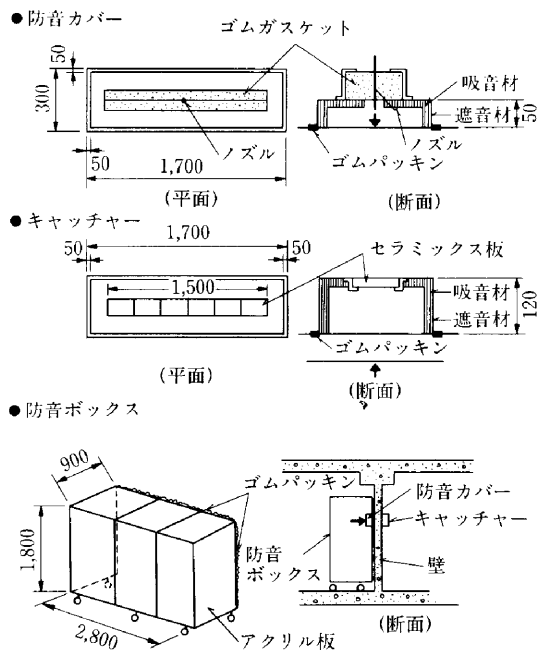


Fig.13 消音対策装置

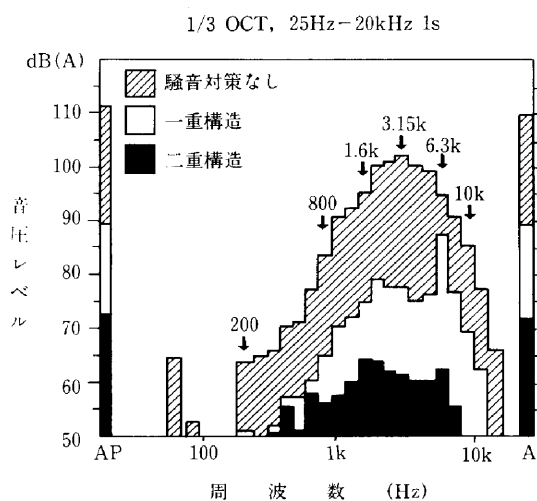


Fig.14 周波数分析結果

(4) 測定結果

測定結果の一覧を Table 1 に示す。

壁切断時の測定項目別発生騒音の音圧レベル差と周波数の関係は、Fig. 14 に示す。騒音対策なしにおいては、800Hz～8 kHz に高周波成分が卓越しており AP で 111dB であった。一重構造の場合は、89dB であり 6.3 kHz が 2 kHz～8 kHz より 10dB 程度高い値を示している。二重構造の場合は、800Hz～8 kHz の帯域でほとんど差がなく、AP で 73dB と約 40dB 程度の消音効果があった。

Table 1 測定結果

測定項目	騒音レベル dB(A)	①～(②～③) dB(A)
① 騒音対策なし(原音)	111	—
② 一重構造(防音カバー+キャッチャー)	89	22
③ 二重構造(②+防音ボックス)	73	38

4-5 考察

壁およびスラブの切断工法の開発より、以下の事項が確められた。

- ① 切断要素の設定は、基礎実験で得られたデータをそのまま使用でき、周辺機器も十分機能を発揮できた。
- ② 防音カバーおよびキャッチャーの設置により、切断時の 110dB 前後の騒音が約 90dB に低減できた。また切断後の WJ および練り粉の飛散は無く、施工ヤードを汚すことがなかった。
- ③ 防音カバーおよびキャッチャーの外側に、さらに防音ボックスを設置すると、騒音を約 70dB に低減できた。
- ④ 切断に伴う振動は 50dB 以下であり、ほぼ無振動であった。

§ 5. おわりに

以上、本研究により、ARA-JIN 工法の基礎技術が確立された。今後は、全ての建設分野に対応できるよう研究範囲を広げ、周辺機器の高性能化を予定している。

最後に、本工法の開発に際し、平塚製作所ならびに東京建築(支)近藤晴貞氏の多大な御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。