

ウォータージェットを用いた コンクリート構造物の補修技術

日本ウォータージェット施工協会

1. はじめに

近年、塩害、中性化など、種々の要因によりコンクリート構造物の劣化が深刻な状況となってきた。また、耐震性向上、車両重量の制限緩和への対応などにより構造耐力の増強も必要となってきた。これらの要請から、コンクリート構造物の補修・補強を目的とした工事は、急速に増加しており、より品質の高い、かつ低コストの補修・補強工法に対する要望も高くなっている。

補修・補強工事においては、多くの場合、コンクリートの切断、はつり、削孔を伴うが、とくにははつり作業においてはブレイカーのような打撃を主とした工法が用いられており、既設構造物の品質低下という点で問題があった。ウォータージェット工法は、既設構造物に対する損傷がなく、はつり面に対する補修コンクリートの付着が極めて良好であるという点などから、欧米においては広く普及しており、わが国においても、今後コンクリート構造物の補修・補強の主力工法として期待されている。

以下では、コンクリートのはつり処理、削孔技術を中心とし、ウォータージェット技術の変遷、特徴・用途、各種装置と性能等について解説する。

2. 技術の変遷

ウォータージェットは、図-1に示すように高圧ポンプで加圧した水を、小口径のノズルから高速の水噴流として噴出させたものである。この水噴流が対象面に衝突したときに生ずる圧力（衝突圧）と力（衝突力）および水くさび作用により対象物を破壊する。ウォータージェットには、それ以外にも

- ① 水の流れを利用した洗浄、運搬、攪拌、混合作用
- ② 噴射反力による推進

など、さまざまな作用がある。産業界では、これらの作用を組み合わせることで水力採炭、地盤掘削・改良、各種材料の切断、プラントや下水の洗浄、コンクリートのはつり、目荒らしなど、さまざまなかたちで利用されてきた。以下にウォータージェット技術の変遷について示す。

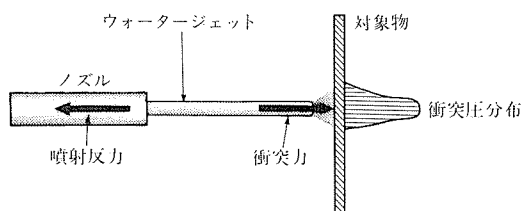


図-1 ウォータージェットの作用

2.1 ウォータージェット技術の起源

イギリスでは、1800年代の後半、砂利を掘るために低圧の水が使用され、1900年代には、炭鉱から掘り出した石炭を土砂と選別するために10 MPa程度のウォータージェットを使用したことが記されている。

20世紀初頭、ソ連で水力採炭法が実用化されて以降、アメリカでのウォータージェットを使った木材の切断、イギリスにおける岩石の切断など、数多くの研究成果が見られるようになった。この頃すでに、現在の高圧ウォータージェットの原型らしきものが製作されているが、当時は高圧部分の材料の選定に腐心し、本格的な実用化には至っていなかったようである。

こうした中、1947年、雨の中を飛行中のアメリカ空軍機B-24のレーダードームにすり鉢状のくぼみが見つかった。その後、これが水滴との衝突によるものであることが確認された。この出来事がウォータージェットの可能性を広げるきっかけとなった。すなわち、高速の水を静止した固体に衝突させたときに、金属などの硬い材料でも変形させることが可能であることが確認されたのである。これ以降、ウォータージェット加工に関する研究や技術開発が盛んになった。

2.2 日本における技術の導入

1961年、プラントの建設コンサルタントであるアメリカ人技師からの薦めで、メンテナンスに必要な機器として35 MPaガソリン駆動のウォータージェットが輸入された。当初は、プラントの熱交換器の清掃作業で試験的に使用され、やがてその効果が確認されるとコンビナートで新しいウォータージェットの市場が形成された。その後は、アメリカやドイツからの輸入と併せて国産化も進み、プラントの規模拡大、高性能化に伴って徐々に高圧化が図られていった。

当時、プラントのメンテナンス工法としてウォータージェットが注目され、採用された理由は、以下の特性によるものである。

- ① 作業単位が小規模で水のみで作業が実施できる。
- ② 水のみでの洗浄のため製造過程に不純物が残らない。
- ③ 薬品で溶解できないスケールも除去できる。
- ④ 廃液処理が比較的容易である。

現在もこの市場では、ウォータージェット技術が完全に定着している。

2.3 建設分野での技術開発

次にウォータージェットが市場を形成したのは、下水道の整備事業である。それまでは、下水管に堆積した汚泥土砂の除去作業は人海戦術的な工法に頼っていたが、需要増

加に伴う労働力不足から従来の方法では対応できなくなり、ウォータージェットで土砂をマンホールの下部に集め、バキュームで吸引する方法を用いるようになった。現在も、わが国におけるウォータージェットの顕在化市場として最大のものである(図-2)。やがてウォータージェット装置は、需要の増加とメーカーの開発努力により、超高压時代に突入、自動車、電子部品関連メーカーの工場設備などでは次々とウォータージェットが導入されていった。

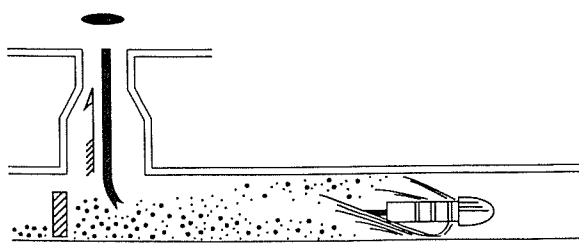


図-2 下水道管内の汚泥土砂除去工法

1980年代に入り、ウォータージェットに研磨材を混入したアブレイブジェットが欧米で開発されたのを機に、大手建設会社の開発部門がアブレイブジェットによる構造物切断の研究開発に着手しはじめた。アブレイブジェットは、数十cm厚さの鉄筋コンクリートを切断でき、遠隔操作や低騒音化も可能であったため、

- ① トンネル本坑コンクリートの切削
- ② 住宅・都市整備公団(現、都市基盤整備公団)「2戸1工法」
- ③ ダムゲート部分の切削、連壁の切断
- ④ JPDR解体(日本原子力研究所)

などに利用された。

同時期に、研磨材を使用しない通常のウォータージェットにより、コンクリートの表面処理、はつり処理、削孔する技術の開発が進められていた。日本においては、阪神・淡路大震災を契機に既存橋脚の補修・補強の必要性が認識され、これに伴うコンクリート橋脚のはつり、目荒らしにウォータージェットが採用された。以降も高速道路や公共建造物で耐震補強前の下地処理工法として各地で採用されるようになった。

1990年代に入り、コンクリート構造物の劣化が社会問題化する中、日本道路公団では、構造物の補修・補強工法に関する技術検討を目的として、1997年に新旧コンクリート一体化検討会を組織し、補修・補強技術の調査や評価試験および技術マニュアルなどの作成を行った。この検討会では、すでに欧米でコンクリート構造物補修の主力工法となっていたウォータージェットに着目しており、これを用いたコンクリートの表面処理、はつり処理の特性把握と適用性確認が重要な目的であった。これを機にウォータージェットの構造物補修への利用が本格化することになる。

3. 特 徴

ウォータージェットは、極めて自由度の高い加工技術であり、噴射圧力や噴射方式を適切に選択すれば、軟質材料

から硬質材料までさまざまな材料の加工が可能となる。また、ノズルの形状やノズルの動かし方を変えることにより、切断、破碎、削孔、洗浄などさまざまな作業に利用できる。このような多様性は、ウォータージェットの大きな魅力ではあるが、その反面、安易に条件設定を行うと、本来もっている能力を十分に引き出せないことになりかねない。したがって、ウォータージェットは、対象材料や利用目的、作業内容により、常に適切な使い方を注意深く選択することが要求される技術と言える。

コンクリート構造物の改修に利用する場合、以下の事項がウォータージェットの利点となる。

- ① 鉄筋を損傷することなくコンクリートを除去できる。
- ② 適切な圧力、流量を選択することで脆弱部を集中的に破碎できる。
- ③ 破碎部周辺の健全性を確保できる。
- ④ 先端装置(ノズル)が小さいので、ロボット化が容易である。
- ⑤ 低振動、無粉塵、温度上昇がないなど、周辺環境に与える影響が少ない。

一方、ウォータージェットは、非常に高い圧力を用いるため、その危険性に対する十分な配慮と対策が必要となる。最も危険なのは、ウォータージェットが直接作業員に衝突するケースで、ほとんどが大きな傷害となる。この種の事故は、後述するハンドガンによる施工で生じやすく、日本ウォータージェット協会では、非常時には瞬時に降圧できる安全装置の装着を奨励している。また、大流量(200 l/min程度)を使用する場合は、給水栓の確保が困難なケースがあり、事前に十分な調査と計画が必要である。はつりや切断作業では、廃水はpH12程度のアルカリスラリーとなり、固形分の分離とpH処理が必要となる。

4. 各種工法とその性能

コンクリート構造物を対象とした場合、ウォータージェットの工法は、①切断、②表面処理、③はつり処理、④削孔に大別できる。以下、それぞれの工法について使用機器と性能を概説する。

4.1 切 断

前述したように、切断工法としてはアブレイブジェットと呼ばれる技術が一般的に利用されている。これは水噴流に硬質の粒状体を添加し、固液が混合した状態で対象物に衝突させる方法である。研磨材の添加方法によりさまざまな方式があるが、ノズル先端で添加する乾式添加方式が一般的である。図-3¹⁾に乾式添加方式の基本構成を示す。アブレイブジェットは、金属も切断可能なため、主に鉄筋コンクリートや鋼材の切断(水中・土中切断が中心)に利用されている。圧力領域は50 MPa~300 MPaで、いずれの圧力においても、おおむねエネルギーに比例した切削能力を得ることができる。水中で用いるときは、水深が深くなると能力の距離減衰が大きくなるため、環状のエアージェットをノズル出口の周囲から噴出させ、減衰を緩和する。図-4に、それぞれの噴射動力に対する時間あたりの切削面積(切

乾式添加方式

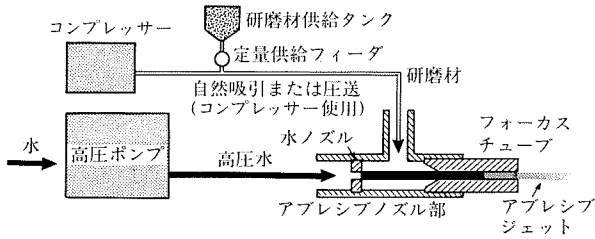


図-3 アブレシブジェット基本構成 (乾式添加方式)¹⁾

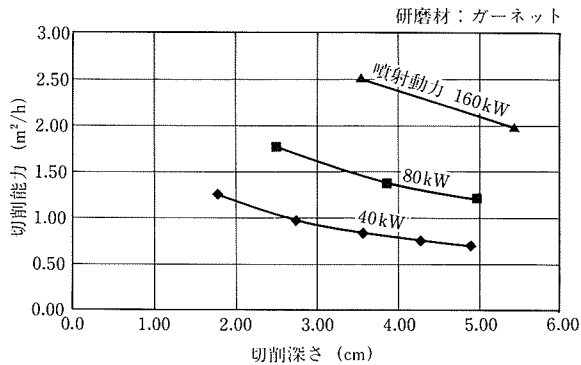


図-4 アブレシブジェットのコンクリート切削能力

削深さ×移動距離)を示す。図から明らかなように、切削深さの増加とともに切削能力は減少する。

4.2 表面処理

コンクリートの表面をウォータージェットで処理する目的には、以下のことが挙げられる。

- ① 表層のレイタンス等を除去し、健全なコンクリート面を露出させることにより打継面の付着性能を向上させる。
- ② 表面をウォータージェットにより荒らし摩擦係数を向上させる。

この場合、図-5に示すノズルが使用される。これらのノズルは塗膜の剥離や汚れの洗浄にも利用される。

(1) 回転揺動式ノズル

小口径のノズルを多数使用し、5mm~10mmの径で回転揺動する方式。処理幅は80mm程度ノズル径が小さいため、スタンドオフの増加に伴う圧力の距離減衰が大きく、至近距離での作業が必要となるが、安全性は高い。表面処理、剥離、洗浄に用途は限定される。

(2) 回転ノズル

回転継手を用い、数本のノズルを旋回させる方式。回転動力として噴射反力を用いる方式(自転方式)とモーターを用いる方式がある。回転数は通常1000 r.p.m.以上で使用される。処理幅を広くすることができるため作業性がよい。はつりにも適用可能。

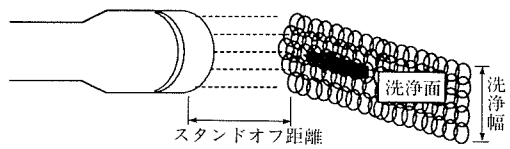
(3) 扇形ノズル

ノズル出口を特殊な形状にし、噴流が扇形に広がるノズル。広がり角は、さまざまなものが準備されている。使用圧力は150MPa程度までで主に剥離・洗浄に利用される。

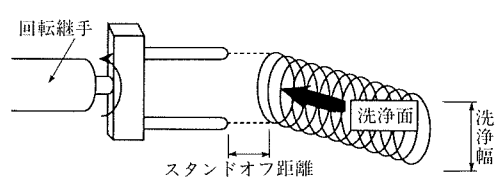
表面処理では、通常これらのノズルをハンドガンと呼ばれる器具(写真-1)に装着し、作業員が手持ちで操作する。

表面処理の性能は、処理目的や対象物により異なるた

a. 回転揺動式多穴ノズル



b. 回転ノズル



c. 扇形ノズル

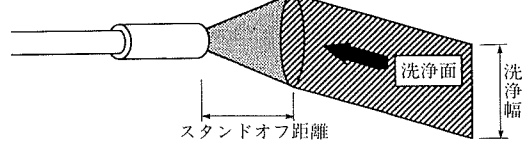


図-5 各種剥離・洗浄用ノズル



現場名 : 国立特殊教育研究所
 既存塗膜の種類 : マスチックC
 除去レベル : 活膜をほとんど除去する
 高压水洗の
 システムの設定 : 圧力 1000 kgf/cm²
 温度 常温
 水量 30 l/min
 ノズルタイプ 扇形
 作業効率 : 50m²/1日
 既存塗膜の状態 : 既存塗膜引張強度 15 kgf/cm²以上完全活膜

写真-1 洗浄工法参考例

表-1 ウォータージェットの表面処理能力と付着強度²⁾

ノズルタイプ	水圧 (MPa)	流量 (l/min)	処理回数 (回)	処理能力 (m ² /h)	付着強度 (N/mm ²)
回転揺動	50	3.0	3	0.8	2.31
	100	4.2	2	2.3	1.82
	150	5.2	1	4.3	2.42
回転	50	6.8	6	3.7	2.03
			1	21.0	2.28
			2	10.5	2.59
	100	9.6	4	5.3	2.45
			1	19.8	2.30
			1	30.0	2.61
扇形	100	6.7	1	4.2	1.64
	150	8.3	1	7.8	2.50

め、ここでは付着力向上を目的とした処理について処理能力および付着強度を表-1²⁾に示す。処理性能は、回転ノズルが明らかに優れているが、付着強度は、処理深さにかかわらず、いずれも高い値を示している。施工能力は、処理性能に1日あたりの稼働時間を乗じたものになる。稼働率は、施工条件により0.3から0.7の範囲で大きく変動する。

4.3 はつり処理

はつり処理においては、構造物の劣化要因により、要求性能は異なる。たとえば、繰返し応力によりひび割れを伴う損傷を生じた部位では、ひび割れを取り除くことが原則であるが、損傷位置、深さを特定することが難しい。このため、一定の深さをはつるのではなく健全部を極力残し、脆弱部を選択的に除去できる工法が望まれる。この目的では、ウォータージェットは最も適した工法と言える。

一方、飛来塩分や融雪剤が劣化要因の場合は、鉄筋の発錆により浮きやひび割れが生じた部分を取り除くだけでなく、鉄筋背面を含めて、塩分濃度の高いコンクリートを一定の深さまで除去し、鉄筋に防蝕処理を施して断面修復することが必要となる。この場合、鉄筋背後のコンクリートの完全な除去とはつり面の平坦性が要求される。これに対応するため、2本のノズルを衝突させることにより噴流エネルギーを消散させ、はつり深さを衝突点位置に高精度に制御する工法³⁾も開発されている。

はつり処理では、ノズルを旋回運動させる回転ノズル方式と揺動ノズル方式(図-6)が一般に利用されている。回転方式では、旋回径を調整することにより幅の狭い溝状の破碎から幅の広い帯状の破碎まで破碎幅を自由に設定できる。また、いずれの方式も鉄筋は健全な状態で残り、コンクリート部分だけの破碎となる。

主な構成装置は、水を加圧するための超高压ポンプ、ノズル部およびノズル部の把持移動装置で、把持移動装置には自走式(写真-2)のものとフレーム式(写真-3)のものがある。高压ポンプは、吐出圧力100 MPa~250 MPa、噴射流量20 l/min~200 l/min程度のものが使用されている。ウォータージェットのはつり能力は、高压ポンプのパワーレベルにおおむね比例し、標準的なコンクリートを深さ100 mmはつる場合で0.001 m³/kWh~0.003 m³/kWhとされている。この能力は、はつり深さやコンクリート強度、配筋量の増加とともに減少する。ノズル材質は、ダイヤモンドやセラミックが使用されており、口径は0.9 mm~3 mm程度である。噴射時の反力は20 kg~200 kg程度となる。ウォータージェット用の水は、シール、バルブ等の破損の恐れがあるため、基本的には上水を使用するが、地下水等を使用する場合は、濁度や金属イオンの含有量を調査し、適用性を十分検討する必要がある。

4.4 削 孔

ウォータージェットによるコンクリートの削孔については、これまでの研究から以下のことが明らかとなっている。

① ウォータージェットによるコンクリート削孔は、ウォータージェットが対象面に衝突したときに発生する圧力により、コンクリートの粗骨材間のモルタル分を切削して、粗骨材を脱落させることで進行する。

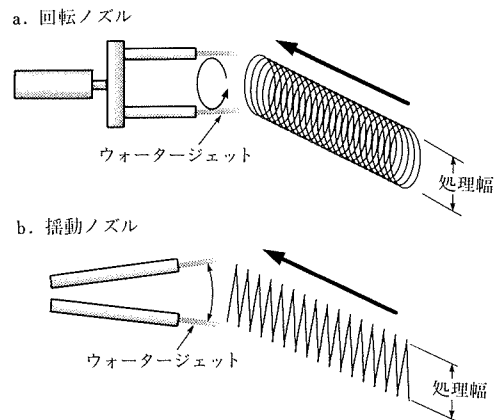


図-6 はつり処理用ノズル方式



写真-2 自走式はつりロボット

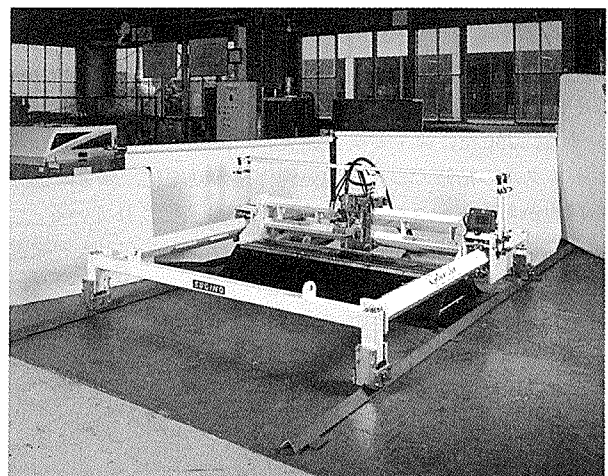


写真-3 フレーム式移動装置

よって、孔壁は、粗骨材による凹凸が生じ、滑らかな面とはならない。骨材は孔内である程度粉碎される。

- ② ノズルヘッドはコンクリートと接触しないで、削孔される。ノズルヘッド先端から数mmから数十mmは先行掘削される。
- ③ 削孔径は削孔速度を遅くするほど大きくなる。ノズルヘッド外径の3倍程度まで拡張した例がある。
- ④ ウォータージェット削孔では、骨材の排出を容易にするために、削孔径をノズルホルダーサイズより大きくする必要がある。
- ⑤ 骨材径が大きい(G_{max} が大きい)場合は削孔速度が

著しく低下する。 G_{max} が 40 以上の場合は 25 に比べて削孔速度が 25% 以下となるとの報告がある。

- ⑥ 骨材径にかかわらず骨材密度が高いと削孔能力が低下する。

削孔装置は、図-7 に示すような型が標準型式となるが、削孔速度の向上と孔壁の平滑さを目的として打撃力を併用したものが開発されている。ウォータージェットを単独で使用した場合の削孔能力は、削孔径 $\phi 50$ mm, 噴射圧力 200 MPa の場合、10 cm/min ~ 30 cm/min (流量 20 l/min) となる。

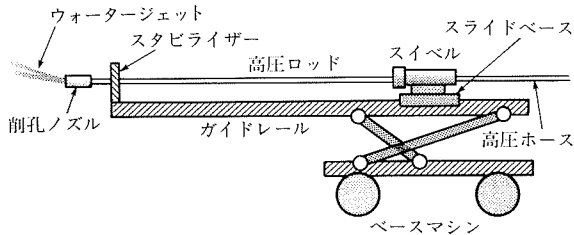


図-7 ウォータージェットを用いた削孔装置

5. 主な適用例⁴⁾

前述したように、ウォータージェットはさまざまな分野で利用されており、その用途は幅広いが、ここでは建設分野とその周辺を中心に主な適用例を紹介する。

5.1 発電分野

火力発電所では、経験的にスケールや異物付着防止のための対策を講じている。この中で、とくに熱交換装置に付着した貝藻類の除去にウォータージェットがたいへん有効な手段となっている。

また、250 m に達する集合煙突の内部に張り巡らされた耐火モルタルの補修では、下地処理作業の効率化、騒音防止等の目的からウォータージェット工法が最適とされている。

さらに、水力発電所の導水管内面のライニング、火力発電所の重油貯蔵タンク(石油備蓄基地のタンク)のライニングの除去に、従来より使用されてきたサンドブラスト工法に代わり、作業環境の改善、廃棄物を減少させる目的で超高压のウォータージェットが検討されるようになった(写真-4)。また、原子力施設では放射能汚染物の除去に用いられている。

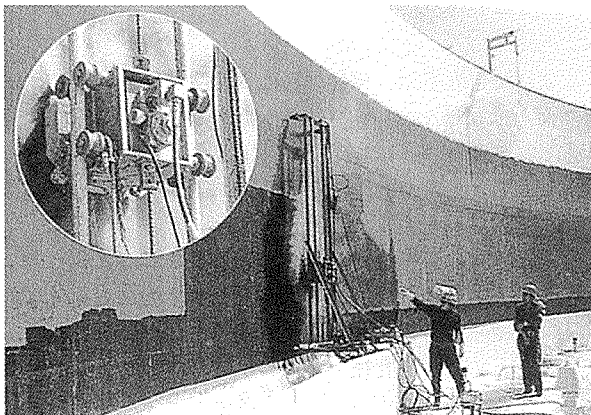


写真-4 火力発電所燃料用石油タンク内壁ライニングの除去

5.2 下水道施設分野

わが国の下水道普及率は全国平均で約60%と言われているが、政令都市では、すでに98% (平成11年現在) に達している。当然のように下水道管の維持管理需要も増加し、中圧大容量の水で管内に堆積した汚泥土砂を取り除く工法が、1965年頃から普及しはじめた。さらに都市下水管に留まらず、ビル・マンションなどの下水管のメンテナンスにも小型化したウォータージェットが定型的に使われるようになってきた。

現在、同分野がウォータージェットの市場としては最大のもので、推定 3 000 台の下水洗浄車が全国各都市に配備されている(写真-5)。

また、最近では下水道処理施設の老朽化したコンクリート部分の補修に、一部従来の手ばつりに代わって超高压のウォータージェットが使用されている。



写真-5 下水洗浄車

5.3 建設分野

(1) アブレシブジェットによる切断

- ① 住宅・都市整備公団(現、都市基盤整備公団)では、狭くなった団地において隣接した住居の仕切り壁を取り除き2戸を1戸にする工法、通称2戸1工法が実施され、壁を破壊する際の振動、騒音が少ないなどの特徴からアブレシブジェットが採用された。

- ② 1988年、日本原子力研究所動力試験炉の解体作業で、炉心を取り巻く生体遮蔽壁の高放射線部分の切断解体に利用した(写真-6)。切断する際、放射線被曝の低減や発生粉塵の抑制などの点が評価され、噴射圧

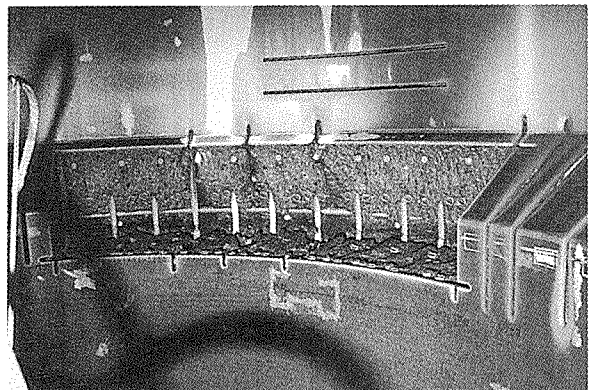


写真-6 生体遮蔽壁切断状況

力 200 MPa, 噴射流量 50 l/min のアプレシブジェットが使用された。

- ③ 不要となった鋼管矢板を撤去するため、水深 5 m の水中で鋼管内部から切断した。噴射圧力 250 MPa, 噴射流量 10 l/min で ϕ 600 mm の鋼管を 50 分/本で切断。水中における鋼材の切断には、現在も一般的に利用されている。
- (2) ウォータージェットによる表面処理、はつり処理
 - ① 1994年、北陸自動車道・手取川橋の橋梁下面の塩害に侵されたコンクリートを 50 mm の深さで均一に取り除く作業が実施された(写真-7)。同現場では、高圧水の水力で発錆した鉄筋の錆を除去するなど、ウォータージェット工法の利点が大いに活かされた。日本において最初の大規模施工。
 - ② 1998年、関門トンネルリフレッシュ工事において、消火栓の交換に伴う 2 次覆工コンクリートの箱抜きにウォータージェットを採用。110 MPa, 230 l/min のハイパワーの装置を用いて 70 ヲ所の箱抜きを 10 日という短期間で施工(写真-8)。同時に床版はつりと目地部の打抜きも施工。
 - ③ 空港エプロン改修工事において、付着型オーバーレイ工法の打継面の表面処理にウォータージェットを採用。210 MPa, 117 l/min のポンプを用いて処理深さ 15 mm で施工(写真-9)。

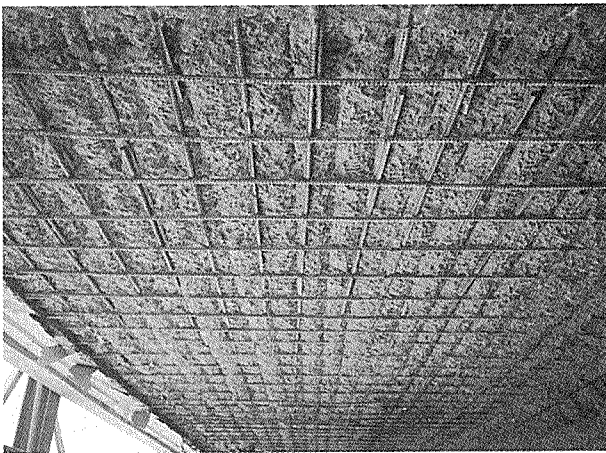


写真-7 床版下面はつり処理面

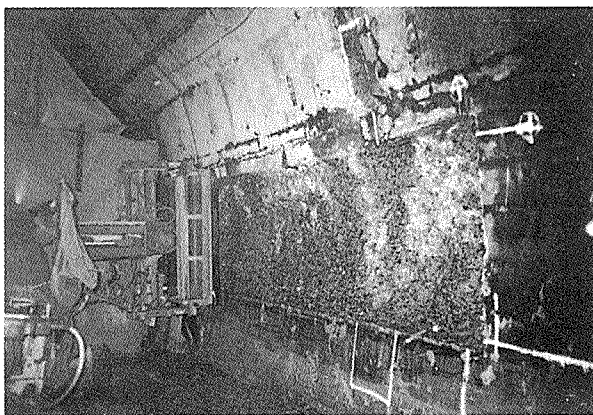


写真-8 関門トンネル2次覆工はつり処理面

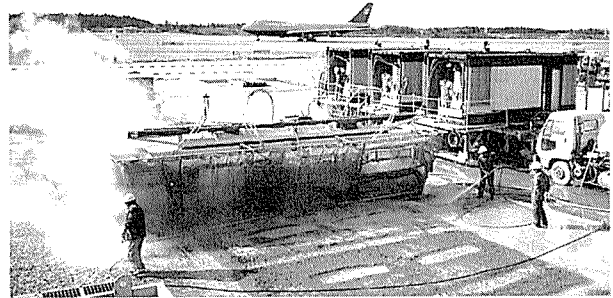


写真-9 空港エプロンの打継面のはつり処理

6. おわりに

ウォータージェットは、構造物の改修・解体技術としてさまざまな可能性を秘めたものであるが、建設業界における工法普及は必ずしも順調ではなかった。その原因としては、

- ① 高度なエンジニアリングが必要な技術にもかかわらず、施工業者がそのレベルに至っていなかったこと
- ② 各社がそれぞれ独自の方向に向かい、施工法や施工基準、機器の基準の統一がとれていないこと
- ③ イニシャルコスト(機器価格)が高く、導入に際し資本金が必要とされること

などが考えられる。

そこで、建設業における切断、削孔、はつり、下地処理、剥離・洗浄などに関するウォータージェット技術の普及と各種技術の円滑な水平展開を図る目的から、1992年12月9日に日本ウォータージェット施工協会が設立された。現在会員は、総合建設会社をはじめ、施工業者、メーカーなど111社で構成されている。協会ではこれまで、

- ① 施工指針の発刊
- ② 安全と施工技術シンポジウムの開催(年1回)
- ③ 安全の手引きの発刊
- ④ 施工計画の手引きの発刊
- ⑤ 技術講習会の開催

などを通じて施工技術と安全に関する啓蒙活動を行ってきた。

建設分野ではリニューアル市場の拡大に伴い、確実にウォータージェットの普及が進むことが予測される。それに伴い、今後ますます施工技術と安全性の向上に対する要求は高くなる。そうした社会的要請に応えるためにも、協会活動の更なる充実により、ウォータージェット技術の健全な発展に寄与できることを願う次第である。

参考文献

- 1) 八尋：最新ウォータージェット工法，鹿島出版会，1996
- 2) 紫桃，上東，野島，吉田：ウォータージェット技術を利用した新旧コンクリート構造物の一体化処理，コンクリート工学，Vol.38, No.8, pp.40~50, 2000.8
- 3) 磯部：衝突噴流によるコンクリートのはつり深さの制御，鹿島建設技術研究所年報，第49号，pp.19~24, 2001
- 4) 小原，峯岸：ウォータージェットの基礎知識，Re+tech, Vol.5, pp.30~38, 2000.3

【2002年1月23日受付】